

室蘭工業大学紀要 第48号 全1冊

その他（別言語等） のタイトル	Memoirs of the Muroran Institute of Technology vol.48
journal or publication title	Memoirs of the Muroran Institute of Technology
volume	48
year	1998-11-13
URL	http://hdl.handle.net/10258/2810

ISSN 1344-2708

No.48

Nov.1998

MEMOIRS

of

THE MURORAN
INSTITUTE OF
TECHNOLOGY

MURORAN INSTITU
INSTITUTE OF TEC
OF TECHNOLOGY
TECHNOLOGY MU
MURORAN INSTITU
INSTITUTE OF TEC
OF TECHNOLOGY
TECHNOLOGY MU
MURORAN INSTITU
INSTITUTE OF TEC
OF TECHNOLOGY
TECHNOLOGY MU

室蘭工業大学
紀 要

第48号 平成10年11月

MURORAN HOKKAIDO
JAPAN

目 次

依頼論文

特 集：平成9年度学内特定研究の報告

Al-Mg合金5182の腐食破壊挙動…………… 世利 修美, 古俣 和直 1

空間描画動作同定に基づく3次元図形プリミティブ入力CADインタフェースの提案
…………… 佐賀 聡人, 安福 尚文 9

薄膜・微粒子の構造と磁気抵抗, 磁性及び超伝導
…………… 上田 勇治, 松田 瑞史, 近澤 進, 酒井 彰, 池田 正二 21

六方晶Ru-B-M(M=Co, Mn, Cr)の電気伝導度…………… 佐々木 真, 斎藤 一樹, 長野 淳 33

Inputs of Atmospheric Heavy Metals to the Kushiro Marsh in East Hokkaido
…………… 白幡 浩志, 尹 松, 中村 精次 41

投稿論文

FRPボルト締結体のリラクセーション(構成方程式の応力依存性を考慮した解析)
…………… 齊当 建一, 西田 公至, 石岡 昌瑞 47

ファジィ推論を用いた牽引自動車の後退運転制御…………… 山下 光久, 疋田 弘光, 花島 直彦 55

The Stability of the Solution of Partial Functional Differential Equation with Delay
…………… 代 立新, 張 善俊 61

超小型地球局を利用した衛星通信実験システムの構築
…………… 畑中 雅彦, 鈴木 真也, 岡 和喜男, 杉岡 一郎 67

WWWにおけるJava Appletの性能評価実験…………… 渡辺 操, 畑中 雅彦, 田島 和典, 青木 貴 75

カルコゲナイドガラス及びファイバーの光透過性とCO ₂ レーザーパワー伝送性	稲川 郁夫, 山下 俊晴, 西井 準治, 城谷 一民	81
Central Cycles in Graphs.....	山口 忠, L. フォルド, J. ラム	93
Numerical Estimation on Correlation Inequalities for Holley-Liggett Bounds	アレックス トレチャコフ, ウラジミール ベリツキー, 今野 紀雄, 山口 忠	101
フッサールの数理哲学(1)―「意味論的完全性」概念の不存在―.....	二宮公太郎	107
補助動詞「やる」の基底に存在する認識について.....	松本 敏治, 塩谷 亨	117
漢字・読字書字困難を示す学習障害の症例.....	松本 敏治	125
心理治療に現れる対人関係.....	前田 潤, 松本 敏治	137
「エルサレム」における「教会の覚醒」.....	安藤 栄子	147
„Siddhartha“ als Weltliteratur—eine vergleichende literaturwissenschaftliche Forschung	大村 英繁, マルセル・W・シャルーパ	153
Prenuclear elements in Hawaiian noun phrases.....	塩谷 亨	161
フランス語における中性代名詞クリティック “y”, “en” について.....	藤田 健	169

Al-Mg合金5182の腐食破壊挙動

世利 修美^{*1}, 古保 和直^{*2}

Behavior of Stress Corrosion Cracking on Aluminum-Magnesium Alloy 5182

Osami SERI and Kazunao FURUMATA

(論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

Attempts have been made to clarify the cause of blowout destructions of score on aluminum alloy 5182EOE in a carbonated soft-drink solution at $38\pm 2^{\circ}\text{C}$. Polarization measurements and metallurgical observation indicated that the blowout destruction is caused by pitting attacks of groove of the score. It is pointed out that the exposure of intermetallic compounds containing copper is detrimental to the pitting attacks of 5182 in carbonated soft-drink solution concentrated by vaporizing.

Key words : aluminum, pitting attacks, carbonate soft-drink solution, electrochemical measurements

1. 緒 言

アルミニウム-マグネシウム合金は耐食アルミニウム合金として広く知られており、船舶、車輛、圧力容器、缶材、通信機器の部品用材料等に広く使用されている。特にアルミニウム-マグネシウム合金 5182 はその強度と非熱処理性により保存容器としての缶用材料に広く用いられている。

長期の保存期間中酸素を全く通さず、しかも経済的である。アルミニウムを保存用缶として活用する場合、開缶されるまで絶対腐食してはならないことが必須条件である。特に内容物が食料品や飲料物等の食品関係の場合では厳しい品質管理が要求される。このため、製缶メーカーや材料メーカーでは使用する材料の品質向上のための研究開発の努力が精力的に行われている。

倉庫中に保管された炭酸飲料缶が夏期間中に破裂するという事故が報告された⁽¹⁾。原因はアルミニウム合金 5182 の粒内 SCC 割れと報告された。

SCC 割れの防止方法として、①保管前の洗浄を徹底することと、②保管環境の改善等が推奨されている⁽¹⁾。この腐食事例はアメリカで起こったものであるが、高温多湿の気候風土でしかも非常に厳しい品質管理を要求されている日本では、アメリカの事例も含めて、様々な腐食条件を想定しその原因と対策を把握しておかなければならない。

本研究では各種各条件下で保管した炭酸飲料缶材の電気化学的なデータを実験的に求め、その腐食挙動に関する興味ある知見を得た。アルミニウム合金 5182 の腐食に関するデータの蓄積と整備の一環として得られた知見を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材 供試材は実用に供している缶用アルミニウム合金 5182 材の EOE (Easy Open End の略称。以下、5182EOE と略記する) 及び市販のアルミニウム合金 5182 (以下、5182 と略記する) を

*1 機械システム工学科

*2 函館工業高等専門学校

Table 1 Chemical composition of alloy (wt%)

	5182E0E	5182
Si	0.1	< 0.20
Fe	0.21	< 0.35
Cu	0.12	< 0.15
Mn	0.43	0.20~0.50
Mg	4.5	4.0~5.0
Cr	0.03	< 0.10
Zn	0.12	< 0.25
Ti	0.01	< 0.10
Al	bal.	bal.
JIS H4000		

用いた。5182E0E は、炭酸飲料缶を購入し、そのまま実験に供した。JIS 規格による 5182 の化学成分及び飲料缶蓋部成分を Table 1 に示す。飲料缶蓋部の形状を Fig.1 に示す。試料暴露表面の塗装皮膜を除去し、露出面積は缶蓋部 5182E0E スコア部では 0.1cm^2 、5182 では 40cm^2 とした¹⁾。

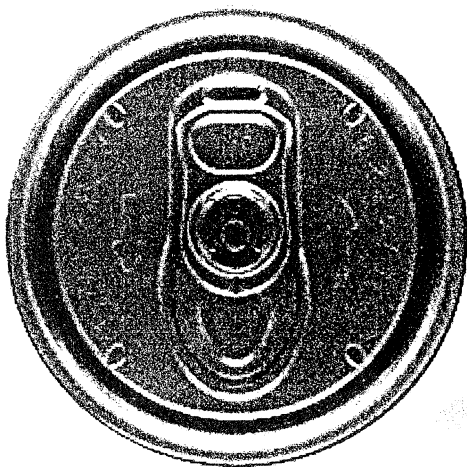


Fig.1 Shape of EOE (Easy open end)

2.2 試験液 試験液には市販の炭酸飲料水を用いた（以下、C水と略記する）。C水成分の詳細は不明だが、表示主成分は糖類（果糖ぶどう糖液糖、砂糖系）、カラメル色素、酸味料、香料、カフェインである。

所定の濃度を得るための希釈と濃縮はそれぞれイオン交換水注入と加熱蒸発により行った。

¹⁾ : スコア部の溝は一樣な深さではなく、螺旋状に深くなっている。スコア部の面積は平均断面積と溝の長さをかけて計算したもので、概略値を示す。

2.3 試験方法

2.3.1 炭酸飲料缶腐食テスト 炭酸飲料缶の蓋部の腐食状況を知るため蓋部、5182E0E に 100% C 水を満たし、ふ卵器中に $38\pm 2^\circ\text{C}$ の状態で 30 日間放置し、缶の破裂の有無を調べた。

2.3.2 自然腐食電位の測定 照合電極はすべて飽和塩化カリウム水溶液中の Ag/AgCl 電極を使用した²⁾。炭酸飲料缶の蓋上部を C 水で満たし、5182E0E 試験片の自然腐蝕電位を浸漬開始から破裂発生までの自然腐蝕電位を 1 分おきに測定し、レコーダで記録した³⁾。

2.3.3 分極曲線の測定 分極曲線の測定は通常のポテンシオスタットを用いる電位走査法で行った。その電位掃引速度は 0.02mV/s に統一した。対極には白金電極を使用した。

3 実験結果

3.1 炭酸飲料缶腐食テスト 炭酸飲料缶の腐食テストを行った。放置日数と破裂缶の累積数の実験の結果を Fig.2 に示す。

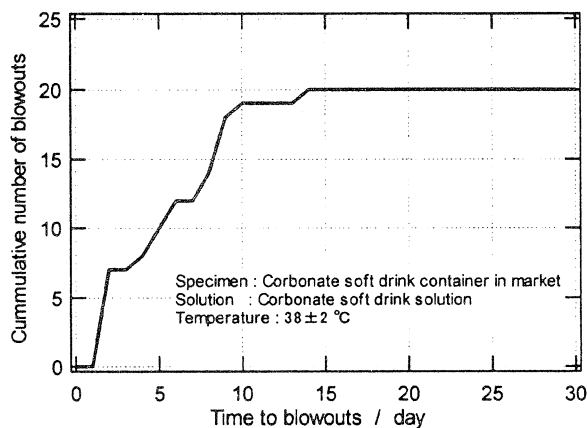


Fig.2 Cumulative number of blowouts

実験開始 2 日目から缶の破裂が起こった。数は

²⁾ : 以下、特に断わらない限り、飽和塩化カリウム水溶液中の銀塩化銀参照電極基準の $V_{\text{vs. Ag/AgCl}}$ を略して V と記す。

³⁾ : 照合電極の経時変化による誤差測定は測定中の任意の時間に行ったが、 $\pm 1\text{mV}$ 以下であったので誤差補正は省略した。

30 缶中 7 缶であった。破裂缶の数はその後 2 週間まで増加したが、それ以降破裂は起こらなかった。破裂はいずれも EOE 部のスコア溝から発生しており、破裂缶にはすべてに水酸化アルミニウム系の腐食生成物の付着が観察された。

破裂したスコア溝の表面観察結果を Fig.3 に示す。

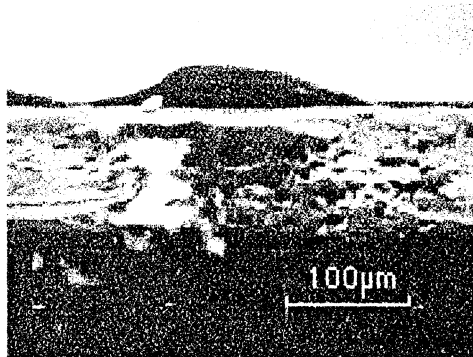


Fig.3 Surface observation of score groove, which is pitting-attacked

Fig.3 において、写真上部の $1\sim2\mu\text{m}$ 位の白い層は缶の内面の塗装皮膜であり、そしてその下の灰色層がスコア部の溝を示している（約 $100\mu\text{m}$ 位の厚さ）。スコア部中央に孔食の跡があり、その左側に白い腐食生成物の付着が見られる。スコア部の溝にはストライエーションなどの腐食疲労を示す表面は見られない。

3.2 自然腐食電位の時間変化 5182EOE の電気化学的データを取るため、室温、大気解放下における自然腐食電位（以下、 E_{corr} と略記する）の時間変化を調べた。その結果を Fig.4 に示す。

測定開始から 4 時間の電位変化はおおよそ -480mV から -630mV と大きく変動している。その後、約 -550mV を示し、おおよそ $\pm 20\text{mV}$ の幅で変動しながら時間の経過とともに電位は卑に移行し、おおよそ 64 時間後で -610mV を示した。その後、貴方向へ約 -440mV から -560mV と大きく変動し、破裂した。

破裂した 5182EOE スコア部の破面は、Fig.3 とおおよそ同じ表面状態を呈していた。

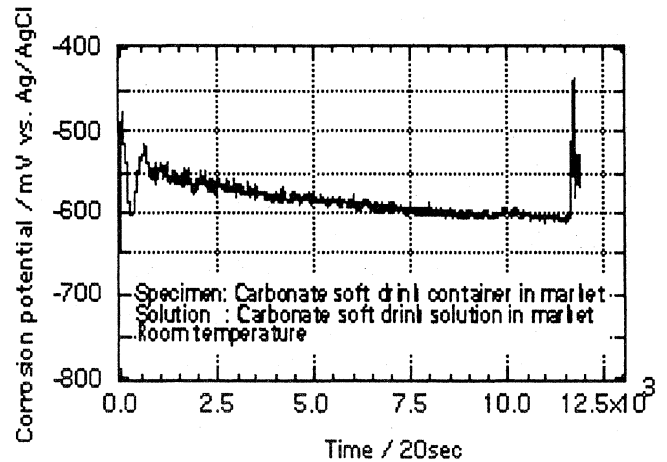


Fig.4 Corrosion potential-time curve for EOE corroded

3.3 アノード分極曲線 C 水の濃度を変化させ、室温における 5182EOE の分極曲線を測定した。その結果を Fig.5 に示す。尚、図中において 100% は C 水の原液、50% は原液をイオン交換水で 2 倍に薄めた液、200% は原液を蒸発させて濃度を 2 倍にした液である。

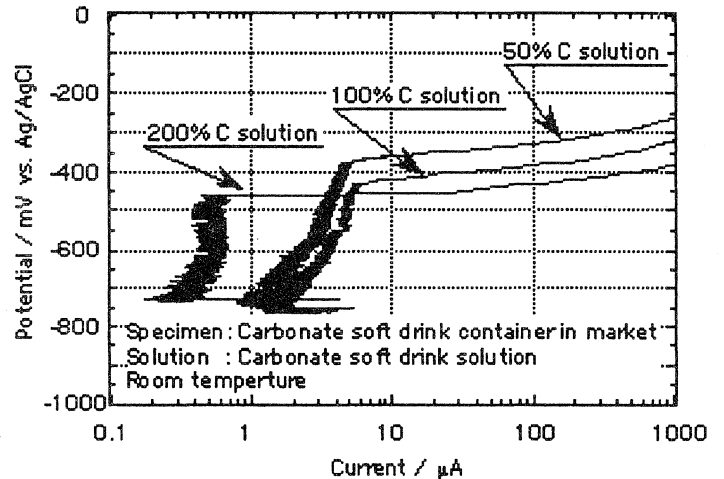


Fig.5 Anodic polarization curves for EOE

常温における 5182EOE の分極曲線は、C 水濃度が 50%、100%、200% 共に明瞭な孔食発生を示す屈曲部すなわち孔食電位（以下、 E_{pit} と略記する）が観察される。

分極曲線より得られた孔食電位 (E_{pit}) と、C 水の濃度の関係を Fig.6 に示す。C 水の濃度が濃くなると E_{pit} は卑な電位に移行している。

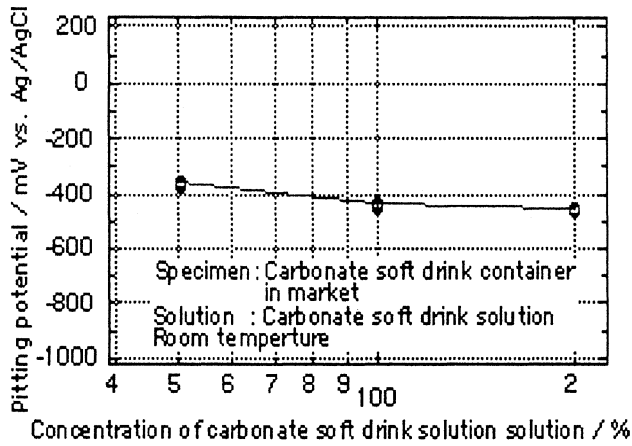


Fig. 6 Relationship between pitting potential of EOE and concentration of carbonate soft drink solution

3.4 純銅と純鉄の分極曲線 アルミニウム缶蓋における孔食では、マトリックスのアルミニウムをアノード部とするガルバニック電池の形成と考えられる。缶蓋中でマトリックスのアルミニウムに対しカソード部になる可能性のある典型的な元素は、Table 1 の缶蓋の成分表から、鉄と銅である可能性が大きい。

アルミニウムの耐食性は含有不純物に敏感で、中性水溶液中での孔食は不純物である Fe によっていちじるしく増加する。また、Cu は Al を強くする合金元素としてもっとも強力であるが、耐食性を悪くする効果ももっとも大きくなり、特に孔食がひどくなる⁽²⁾。

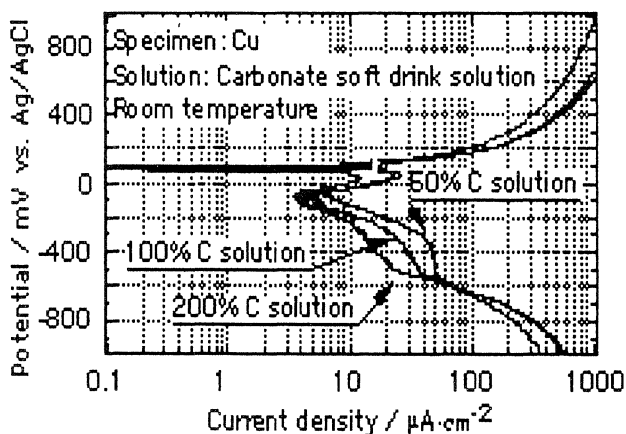


Fig. 7 Polarization curves for pure copper specimen

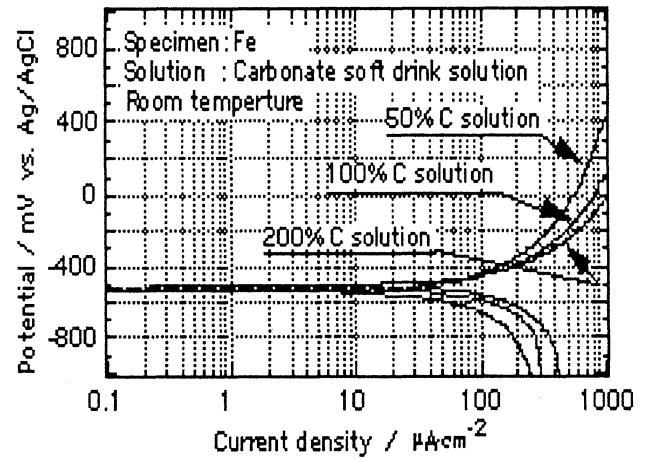


Fig. 8 Polarization curves for pure iron specimen

そこでそれらの炭酸飲料水中での電気化学的挙動を知るために分極曲線を測定した。C 水濃度がそれぞれ 50%, 100%, 200% の水溶液条件における、銅の分極曲線を Fig. 7 に、鉄の分極曲線を Fig. 8 にそれぞれ示す。

銅と鉄のいずれの場合も、アノード分極曲線の形状は、濃度差、温度差による大きな差は見られない。カソード分極曲線では、銅の場合において、 E_{corr} から卑な電位に分極すると約 0 mV 位で極大なカソード電流が流れる。更に分極すると電位と共にカソード電流が増大する。鉄のカソード分極曲線は単純であり、溶存酸素の還元限界電流部を示すプラトー部は現われない。

銅、鉄の E_{corr} と C 水の濃度の関係を Fig. 9 に示す。

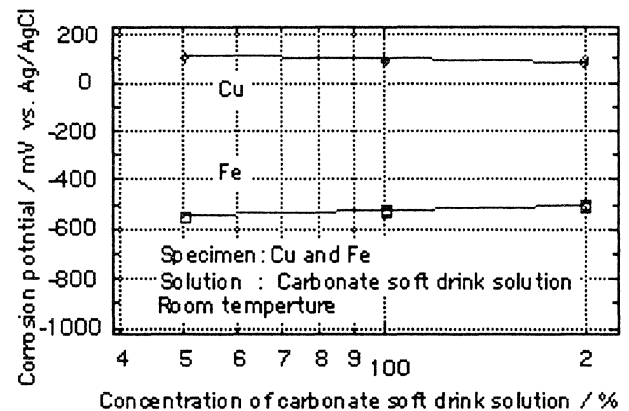


Fig. 9 Relationship between corrosion potential and concentration of carbonate soft drink solution

銅の E_{corr} は室温においては 50% C 水で約 100 mV、200% C 水で約 80 mV と C 水の濃度が濃くなるにつれ

て E_{corr} は卑な電位に移行する。鉄の場合、室温においては 50% C 水で約 -550mV、200% C 水で約 -500mV と C 水の濃度が濃くなるにつれて E_{corr} は貴な電位に移行する。

銅、鉄のカソード分極抵抗 h_c と C 水の濃度の関係を Fig.10 に示す。各カソード分極抵抗は Fig.7 と Fig.8 の E_{corr} の変動域における電位値とその時のアノード電流の値を用い、直線近似より求めた。

室温における 5182E0E の銅のカソード分極抵抗は、C 水濃度の大きさに関わらず、約 $2\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を示す。鉄のカソード分極抵抗は、 $1\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下である。

室温における 5182 の銅のカソード分極抵抗は濃度 50% で大きく約 $6.5\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を示し、C 水の濃度が大きい程小さな値を示す。鉄のカソード分極抵抗はおおよそ一定で $1\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を示し、銅の分極抵抗よりも小さい。

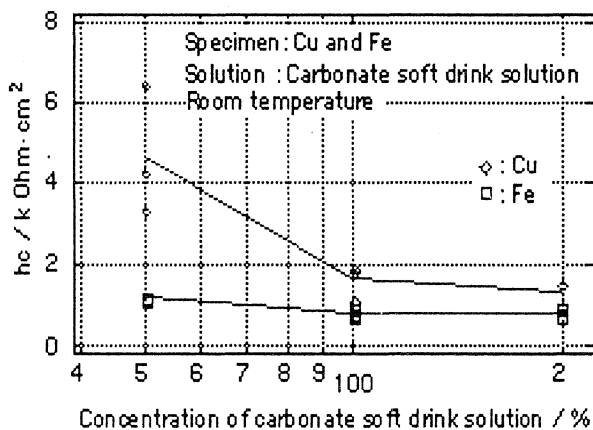


Fig.10 Relationship between cathodic polarization resistance and concentration of carbonate soft drink solution

4. 考 察

4.1 金属組織 アルミニウムは、水素発生形の腐食に対して、金属の純度が敏感に影響する金属のひとつである。アルミニウムにおいて、一般的にマトリックス中に固溶されない添加元素は、金属間化合物として析出する。この金属間化合物の大きさや性質は、添加元素の種類や量、熱処理履歴等により、複雑に変化する。実験で用いた 5182E0E にも、数 μm もしくは、 $1\mu\text{m}$ 以下の金属間化合物が観察された。

また、実際に存在している金属間化合物の化学

組成は多元系で複雑である。5182E0E の金属組織を金属組織と腐食の観点から、一意に固定することが出来ない。しかし、実験に用いた 5182 試片中の金属組織は、基本的には各種合金元素を固溶したアルミニウムマトリックスと多元系金属間化合物の混合組織として取り扱うことができる。

本実験の場合、アルミニウムの腐食挙動において重要な役割を果たすカソード部は、アルミニウムマトリックス中に固溶し難い Fe や、完全に固溶することが出来なかった Cu を含む多元系金属間化合物である。その多元系金属間化合物の存在が 5182 の耐食性を左右しているものと予想される。

4.2 5182 (E0E) のアノード分極曲線と銅のカソード分極曲線 5182E0E のアノード分極曲線と、銅のカソード分極曲線を Fig.11 に示す。5182E0E スコア部に銅と同等のカソード還元反応の能力を持つ物質が存在すれば、E0E の E_{corr} は重ね合わせで決まり、図中のアノード分極曲線上を動く。カソード面積の大小により E_{corr} の位置は決まる。カソードの面積が大きければ大きいほどアノード分極曲線の右側で交差し、孔食発生の可能性が大きくなる。スコア部で破裂した缶材では、その溝部にカソードとして十分な電位を持つ元素、例えば Cu 等を含んだ金属間化合物が存在し、かつそのカソード面積が十分露出した場合に孔食発生が起こったものと考えられる。

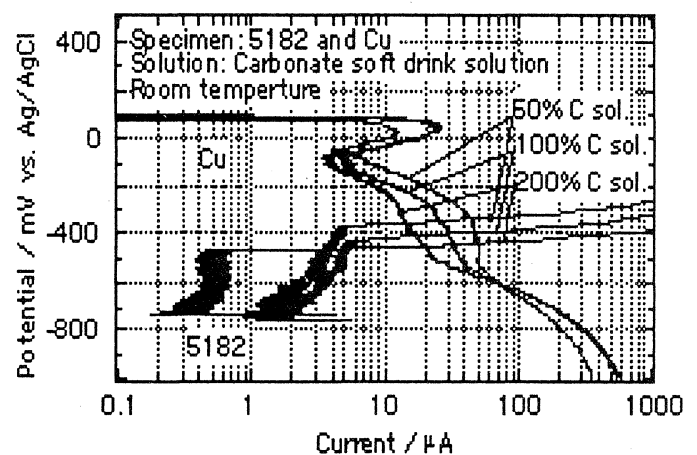


Fig.11 Superimposed polarization curve for 5182 and pure copper specimen

倉庫保管中は時間経過とともに、何らかの原因で缶蓋のスコア部に付着した炭酸飲料水中の水分

は蒸発するため、炭酸飲料水は濃縮される。濃縮した炭酸飲料水中における E_{pit} は卑な電位になる。時間経過と共に E_{pit} はさらに電位へ移行するので、益々孔食発生危険性は高なる。孔食発生を起こす缶材ではその E_{corr} は E_{pit} とほぼ同じ値を示すと考えるれる。

4. 3 自然腐食電位と 5182E0E のアノード分極曲線 5182E0E の破壊現象を応力腐食割れと推定すると、その機構は次のように説明される。上昇してきた転位によって不働態皮膜で覆われたアルミニウム表面が破られ、局部的な過渡的溶解が起こって孔食が発生する。局部的皮膜破壊を生じさせる物質は Cl^- イオンによって代表される。孔の底ではアノード反応、その周辺および外部の不働態皮膜で覆われた覆われた部位でカソード反応が進行するが、孔食先端には偏り面（粒内割れ）や粒界（粒界割れ）が現れるので、アノード反応はますます促進される。アノード反応によって生じた金属イオンの加水分解反応によって H^+ を生じ、亀裂内の pH を低下させる。電気泳動の効果によって塩素イオンは凝縮され、亀裂内部の溶液は外部とは全く異なったものとなる。外部では不働態が維持される状況にあっても、亀裂内部では再不働態が難しい状況となっていく。しかし、孔食が進行するためには周辺部でカソード反応を行う溶存酸素または水である酸化剤が必要である。

一定量の液体に対する気体の溶解度は、温度上昇とともに減少するため、高温に保持した本実験の試験液は、室温時よりも溶存酸素が少ないはずである。本実験において、室温時には破裂を起こさなかった飲料缶が高温時に破裂した理由は、溶存酸素の影響よりも缶内部の圧力が影響しており、多数の微少なピットに缶の内圧による機械的割れを発生し、これらが連続してついに脆性破壊を生じたと考えられる。

4. 4 アルミニウムの孔食発生係数による判定

アルミニウムのアノード分極曲線は単純な形状を示し、電極電位と電流の間には一次関係が一般に成立するとする。分極曲線を重ね合せて孔食発生の有無を判定する従来の幾何学的方法を代数的に表現した無次元係数のアルミニウムの孔食発生係数： f_{pit}^{Al} を導入し、孔食発生時の条件を導出し、次式を得る^{(3), (4)}。

$$f_{pit}^{Al} = (E_c^0 - E_{pit}) / i_{pit}^* (S_a/S_c) h_c \cdots (1)$$

ただし、 E_c^0 : カソード部の自然腐食電位 (mV),

E_{pit} : アノード部の孔食電位 (mV),

i_{pit}^* : 孔食電位での電流密度 ($\mu A/cm^2$),

S_a : アノード部の面積 (cm^2),

S_c : カソード部の面積 (cm^2),

h_c : カソード部の分極抵抗 ($k\Omega \cdot cm^2$)

f_{pit}^{Al} はアルミニウムの孔食発生係数であり、

$f_{pit}^{Al} \geq 1$ ならば孔食発生が起こり、

$f_{pit}^{Al} < 1$ ならば孔食発生は起こらない。

f_{pit}^{Al} に本実験で得られた具体的な数値を代入し、孔食発生の傾向を見積もって見る。5182 の E_{pit} , i_{pit}^* はアノード分極曲線より求まる。 h_c , E_c^0 は銅、鉄のカソード部に関する情報である。ここでは次の仮定が必要となる。つまり、4. 1 で指摘したように 5182 のカソード部はアルミニウム母地にほとんど固溶しない鉄やカソード能力の高い銅を含有した金属間化合物の可能性が高い。そこで E_c^0 を純鉄あるいは純銅の自然浸漬電位で代用し、 h_c を純鉄と純銅の分極曲線より見積もる。しかし、アノード部の面積とカソード部の面積の比 S_a/S_c に関する情報は不明である。通常の腐食過程では S_a/S_c は時々刻々変化しておりアノード、カソードの電気化学的表面積の正確な見積りは出来ない。 S_a/S_c を未知数として、本実験で得られた具体的な数値を f_{pit}^{Al} に代入し、孔食発生係数： f_{pit}^{Al} とアノード部とカソード部の面積比： S_a/S_c の関係を調べた。それらの結果を table 2 に示す。また、求めたそれらの数値から、各水溶液濃度における S_a/S_c と f_{pit}^{Al} の関係を Fig.12 に示す。

鉄の場合、 $E_c^0 < E_{pit}$ となり、 f_{pit}^{Al} は負となる。従って、鉄がカソードの場合では孔食は起らないことになる。銅の場合では、 $E_c^0 > E_{pit}$ となり f_{pit}^{Al} は正となる。 S_a/S_c の値は未定だが S_a/S_c の値が小さくなればなるほど孔食発生の危険性が高くなることを示している。

銅の場合における f_{pit}^{Al} と S_a/S_c の関係をから、 S_a/S_c が一定の場合、C 水の濃度が濃くなれば f_{pit}^{Al} の値は大きくなり、孔食発生の傾向が強くなることを示している。

Table 2 The electrochemical figures derived from the cathodic polarization curves of pure copper specimen, pure iron specimen and the anodic polarization curves for 5182 specimen in a carbonate soft drink solution

concentration /%	Cu		
	50	100	200
E_c^0/mV	105.7	98.7	81.9
E_{pit}/mV	-364.7	-441.7	-461.0
$E_c^0 - E_{pit}/\text{mV}$	470.4	535.4	543.9
$i_{pit}^*/\mu\text{A}\cdot\text{cm}^2$	5.0	3.5	0.54
$h_c/k\Omega\cdot\text{cm}^2$	4.7	1.6	1.3
$f_{pit}^{Al}(S_a/S_c)$	20.2	95.6	773.4
f_{pit}^{Al}	$\frac{20.2}{(S_a/S_c)}$	$\frac{95.6}{(S_a/S_c)}$	$\frac{773.4}{(S_a/S_c)}$

concentration /%	Fe		
	50	100	200
E_c^0/mV	-549.7	-528.7	-503.7
E_{pit}/mV	-364.7	-441.7	-461.0
$E_c^0 - E_{pit}/\text{mV}$	-185.0	-87.0	-42.7
$i_{pit}^*/\mu\text{A}\cdot\text{cm}^2$	5.0	3.5	0.54
$h_c/k\Omega\cdot\text{cm}^2$	1.1	0.8	0.7
$f_{pit}^{Al}(S_a/S_c)$	-32.5	-31.5	-108.2
f_{pit}^{Al}	$\frac{-32.5}{(S_a/S_c)}$	$\frac{-31.5}{(S_a/S_c)}$	$\frac{-108.2}{(S_a/S_c)}$

5. 結 言

市販の炭酸清涼飲料缶の蓋部、EOE(:Easy Open End)を炭酸飲料水中に浸漬するとそのスコア部から腐食した。その腐食形態は孔食であり、1週間以内に30缶中20缶が孔食により破裂した。分極曲線の測定や表面観察を行い、孔食発生を電気化学的に示した。銅元素を含む金属間化合物の表面露出は、付着する炭酸飲料水が蒸発凝縮した環境中において、5182のスコア部の孔食発生因子として悪影響を及ぼす可能性があることを示した。

文 献

- (1) T. D. Burleigh, E. H. Gillespie and S. C. Biondich, Aluminum Alloy for Package. (1993),p323
- (2) G. Ito, Corrosion Science and Engineering, Corona Publishing Co.Ltd.,(1973),p274-275.
- (3) Seri, O., Journal of Japan Institute of Light Metals.(in japanese),vol.46(1996), p404
- (4) Seri, O., Journal of Japan Institute of Light Metals.(in japanese),vol.46 (1990),p51

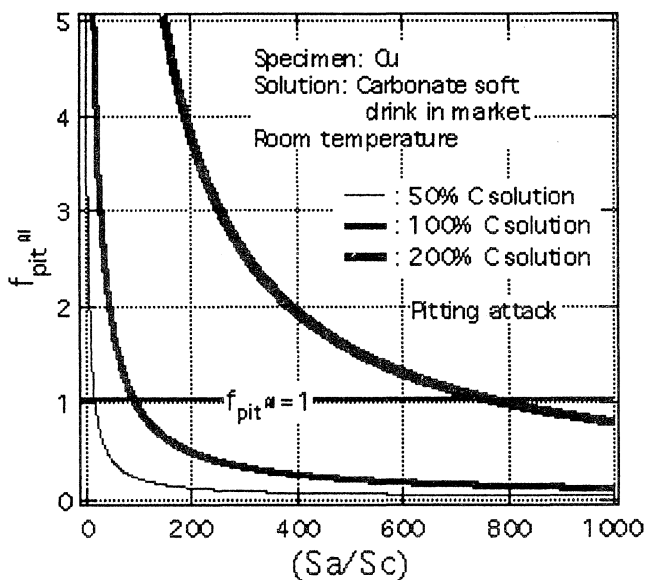


Fig.12 Relationship between pitting attack occurrence factor of aluminum and ratio of anodic area and cathodic area

5182の孔食発生を避けるためにはアノード部よりカソード部の電気化学的な管理が重要となる。つまりカソード部の自然腐食電位、 E_c^0 を出来るだけ

空間描画動作同定に基づく 3次元図形プリミティブ入力CADインタフェースの提案

佐賀 聡人^{*1}, 安福 尚文^{*2}

A Proposal for 3-D Pattern Primitive Input CAD Interface on the Basis of Spatial Gesture Identification

Sato SAGA and Naofumi YASUFUKU

(論文受理日 平成10年 8月31日)

Abstract

This paper proposes a conceptual design of a new intuitive CAD interface for three-dimensional pattern primitive input on the basis of a spatial gesture identification. Then, a three-dimensional version of freehand drawing identification technique named FSCI-3D, the core technology of the proposed interface, is derived as an extension of the two-dimensional version of the technique that we have previously proposed. Finally, FSCI-3D is actualized in an immersive virtual reality environment to demonstrate its basic operation.

Key Words : Fuzzy System, Human Interface, Pattern Recognition, Computer Aided Design, Virtual Reality

1. まえがき

近年のコンピュータの処理能力向上に伴い、設計/製造の分野では、3次元CAD(Computer Aided Design)システムによる製品の3次元設計が一般化してきている。しかし、現在の3次元CADシステムでは、詳細設計を支援する機能の豊富さに比較して、デザイナーの思い描く3次元形状を意匠設計段階で自由に生成できるような機能は未だ十分に充実していない。この一因は、CRTやマウスのような2次元入出力機器を基本としたヒューマンインタフェースを介して間接的に3次元設計を行っていることにありと考えられる。

コンピュータの進歩は、一方で、多様な入出力機器の利用を可能にし、様々な異なる媒体を統合的に活用して人間とコンピュータシステムとの間の情報伝達をより密に行ういわゆるマルチモーダルヒューマンインタフェースを現実のものと

しつつある。その一つとして、空間中の位置情報を直接的に入出力する機器の利用を可能にするVR(Virtual Reality, 仮想現実)技術がある。このVR環境を3次元CADのヒューマンインタフェースとして活用すれば、3次元構造物を3次元空間中で直接的に設計することが可能になり、意匠設計に適した直感的な3次元CADの実現が期待できる。このようなアプローチとして、既に文献(1)では「仮想物体モデラ」が提案されている。仮想物体モデラでは、3次元仮想空間中の「直方体」や「円柱」といったプリミティブ物体に仮想的に触れてこれらを変形させたり、複数のプリミティブ物体を玩具のブロックのように組み合わせたりすることにより、直感的な3次元構造物設計をある程度可能にしている。しかし、ここでは、元となる3次元プリミティブ物体を発生させる段階においてはVR環境の直接操作性が十分に活用されていない。即ち、(1)プリミティブ物体の種類の決定にメニュー選択操作という間接的な操作を必要とする、(2)プリ

^{*1} 情報工学科

^{*2} 大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程

ミティブ物体の種類は予め登録されたものに限られ汎用性が低い, (3) 生成された初期段階のプリミティブ物体の形状, 大きさ, 位置, 姿勢を所望のものにするためには大掛かりな修正作業が必要となる, といった問題がある.

ところで, 人の通常の生活においては, 手で描画動作をすることによって図形の種類, 形状, 大きさ, 位置, 姿勢などを一度に相当程度まで表現することができる. ここで, もし, このような自然な図形の表現法を 3 次元 CAD の入力インタフェースに利用できれば, あたかも仮想空間中にデザインするような感覚で直感的かつ直接的に幾何学的 3 次元プリミティブ物体を生成させることが可能になり, 3 次元の意匠デザインが格段に容易になることが期待される.

本論文は, このような考え方にに基づき, 空間描画動作同定に基づく 3 次元図形プリミティブ入力 CAD インタフェースの基本的なアイデアを提案する. またその実現のための中核技術として必須となる 3 次元手書き曲線同定法「FSCI-3D」を提案し, これを用いた 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェースを試作してその動作を確認する.

2. 空間描画による 3 次元図形プリミティブ入力 CAD インタフェースの提案

3 次元 CAD においては, 「直方体」, 「球」, 「円柱」, 「円錐」といった基本的な幾何図形プリミティブを組み合わせて 3 次元構造物を構成することが多い. 従って, これら所望の種類の図形プリミティブを所望の形状, 大きさ, 位置, 姿勢に瞬時に配置することができれば, 3 次元の意匠デザインの作業効率が大幅に改善される. とところで, 人は描画動作によって図形の種類, 形状, 大きさ, 位置, 姿勢などを相当程度まで直接的に表現することができる. 本論文では, この点に着目して, フリーハンドの空間描画動作に基づく 3 次元図形入力 CAD インタフェースの基本的なアイデアを提案する.

ここでは, まず CAD における 3 次元図形プリミティブの多様性について指摘し, つぎに, その表現法として空間曲線の組み合わせによる表現法が汎用性の点で有効であることを示す. さらに, これらをもとに, 空間描画による 3 次元図形プリミティブ入力法の基本的な考え方を提案する.

2.1 CAD における 3 次元図形プリミティブの多様性とスイープ操作による統一的表现

3 次元設計の元となる幾何学的な図形プリミティブの種類として代表的なものだけでも, 「立方体」, 「直方体」, 「球」, 「楕円体」, 「円錐」, 「円柱」, 「角柱」, 「角錐」, 「トーラス (円環面)」などがすぐに挙げられる. また, これらの一部からなる図形プリミティブ, 例えば「半球」や「半円柱」, 「円錐台」

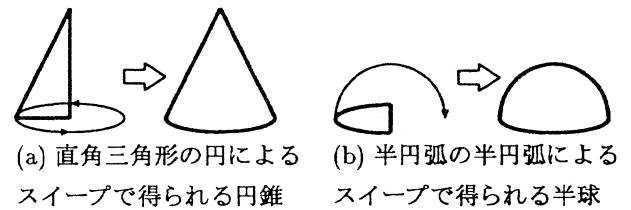


図 1: スイーピングによる円錐と半球の表現例

などを含めてゆくとその種類は爆発的に増える. 従って, 図形プリミティブを列挙して単純にメニューに登録してゆくようなアプローチでは図形プリミティブの種類の多様性に網羅的に対応することが困難になる.

さらに, 3 次元図形プリミティブでは, その自由度の大きさゆえ, 形状, 大きさ, 位置, 姿勢を指定するパラメータの数が多くなり, しかも種類ごとに指定するパラメータの性質が異なってくるために統一的な操作が難しくなる.

ここで, これらの多様な図形プリミティブを簡素かつ統一的に表現する方法としてスイーピングと呼ばれる手法が有効となる. これは, ある閉じた平面曲線によって形作られた図形を別の曲線に沿って掃引 (スイープ) したときの軌跡として立体を定義するものである. 例えば, 「円錐」や「半球」は図 1 のようにスイーピングで表現できる.

スイープ操作は, その効果そのものが人間の直感で理解しやすい上に, その表現力は汎用性に優れており, 上述の 3 次元図形プリミティブの大半は例えば表 1 のようにスイープ操作で統一的に表現できる. またスイーピングでは, 3 次元プリミティブの形状を立体のパラメータによって直接指定する代わりに, スイープ図形の形状とそのスイープ経路の形状との二段階に分けて設定するため, 形状パラメータの設定が簡素で理解しやすいという特徴がある.

表 1: スイーピングによる 3 次元図形プリミティブの表現例

3 次元図形プリミティブ	スイープ図形	スイープ経路
立方体	正方形	線分
直方体	長方形	線分
球	円	半円弧
楕円体	楕円	半円弧
円錐	直角三角形	円
円柱	円	線分
角柱	多角形	線分
角錐	—	—
トーラス	円	円
半球	半円弧	半円弧
半円柱	長方形	半円弧
円錐台	台形	円

2.2 空間曲線プリミティブによる3次元図形プリミティブの汎用的な表現

スイープ操作によって3次元図形プリミティブを表現することにすれば、その指定は、空間中におけるスイープ図形の指定とスイープ経路の指定に置き換えられる。ここで、スイープ経路に関しては表1の例にみるように、「線分」、「円」、「円弧」がその主なものとなる。一方、スイープ図形に関しては多様な平面閉図形が想定される。しかし、これらについても幾何学的なスイープ図形として重要な空間平面図形は、「線分」、「円」、「円弧」、「楕円」、「楕円弧」という高々5種類の空間平面曲線の組み合わせで表現されることがわかる。

以上のことから、結局、「線分」、「円」、「円弧」、「楕円」、「楕円弧」という5種類の空間平面曲線を空間中に配置することができれば、これによって主な3次元図形プリミティブがスイープ操作として表現されることになる。即ち、空間曲線プリミティブとしてこれら5種類の空間平面曲線を採用するだけで、多様な3次元図形プリミティブに対する汎用的な表現が得られることになる。

2.3 空間描画による汎用的な3次元図形プリミティブ入力の基本的な考え方

前節までの議論により、汎用的な3次元図形プリミティブ入力の実現は、空間曲線プリミティブ入力の実現に置き換えられる。ここで、曲線プリミティブを直感的かつ瞬間的に表現する人間にとって最も自然な手段の一つとして空間中の描画動作がある。従って、この空間描画表現をVR環境を介して利用できれば直感的かつ汎用的な3次元図形プリミティブ入力インタフェースを実現できることになる。

さてここで、空間描画に基づく図形入力インタフェースを実現するうえで中核的な問題は、空間描画を如何に幾何学図形として同定するかという点である。VR環境の3次元入力デバイスを用いれば描画動作を時系列の位置データとして計測することは可能である。しかし、これは「信号」レベルの情報に過ぎない。描画曲線を図形入力に利用するには、これを上述の空間曲線プリミティブのような幾何図形という「記号」レベルの情報として認識、同定する必要がある。ところで、この種の手書き描画の同定法として、2次元平面上の問題に関しては、既にFSCI (Fuzzy Spline Curve Identifier) と呼ばれる手書き曲線同定法が提案され⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、その有効性が示されている⁽⁵⁾。従って、この2次元FSCIのアルゴリズムを3次元に拡張し、空間描画動作を空間曲線プリミティブの集合体として同定するアルゴリズムFSCI-3Dを構築すればこの問題は解決することになる。

もし、この空間描画同定法FSCI-3Dが実現されたと仮定

すれば、例えば、以下のような手順に基づくヒューマンインタフェースをVR環境中に構築することで、フリーハンドの空間描画動作に基づく直感的な3次元図形プリミティブ入力CADインタフェースを実現することができる。ただし、ここで、下線を付したステップが人間の操作する部分である。

(1) スイープ図形の決定：

- (1.1) 空間描画：スイープ図形を仮想空間中に一筆書きで描画する。
- (1.2) 空間描画の分割 (FSCI-3D)：描画運動中の一時停止動作に基づいて描画の分割を行い分割候補点を描画曲線上に表示する。
- (1.3) 分割の修正：分割候補点を確認し、必要に応じて表示された分割候補点をクリックすることにより分割候補点の取捨選択を行って分割を決定する。
- (1.4) 空間描画の同定 (FSCI-3D)：分割された各々の空間描画を空間曲線プリミティブとして同定し、各々について第一候補となった空間曲線プリミティブの種類と形状を仮想空間中表示する。
- (1.5) 空間曲線プリミティブの種類修正：仮想空間中表示された各空間曲線プリミティブの第一候補の種類を確認し、必要に応じて表示候補のクリックにより次候補を選択して、各空間曲線プリミティブの種類を決定する。
- (1.6) 形状パラメータ値の自動丸め処理：各空間曲線プリミティブの長さ、角度、位置などのパラメータ値を予め定めた分解能に従って丸めることによって整形した空間曲線プリミティブを制御点^{*3}とともに仮想空間上に表示する。
- (1.7) 形状パラメータ値の微調整：必要に応じて表示された制御点をドラッグすることによって各空間曲線プリミティブの形状パラメータを微調整してスイープ図形を決定する。
- (1.8) スイープ図形の表示：決定されたスイープ図形を制御点とともに仮想空間上に表示する。

(2) スイープ経路の決定：

- (2.1) スイープ操作点の選択：スイープ図形上に表示された制御点の内の一点をクリックすることによりスイープ操作の対象となる点を選択する。
- (2.2) 空間描画：スイープ経路を仮想空間中に描画する。
- (2.3) 空間描画の同定 (FSCI-3D)：空間描画を一つの空間曲線プリミティブとして同定し、第一候補となった空間曲線プリミティブの種類と形状を仮想空間中表示する。

^{*3} 中心点、外接四角形の頂点など、5種類の空間曲線プリミティブごとに予め特徴的な点を制御点として定義しておく。

(2.4) 空間曲線プリミティブの種類の修正: 仮想空間中に表示された曲線プリミティブの第一候補の種類を確認し, 必要に応じて表示候補のクリックにより次候補を選択して, 空間曲線プリミティブの種類を決定する。

(2.5) 形状パラメータ値の自動丸め処理: 各空間曲線プリミティブの長さ, 角度, 位置などのパラメータ値を予め定めた分解能に従って丸めることによって整形した空間曲線プリミティブを制御点とともに仮想空間上に表示する。

(2.6) 形状パラメータ値の微調整: 必要に応じて表示された制御点をドラッグすることによって空間曲線プリミティブの形状パラメータを微調整してスイープ経路を決定する。

(3) 3次元図形プリミティブの生成: 決定されたスイープ図形とスイープ経路に従って3次元図形プリミティブを生成して, 仮想空間中に表示する。

この手順では, 全ての操作が, 仮想空間中での描画動作, あるいは, 仮想空間中に表示されたオブジェクトに対するクリックやドラッグといった直感的な図形操作によって実現されるのがわかる。また情報の殆どは描画動作によって伝えられ, その他の操作による情報伝達は, 次候補選択やパラメータの微調整といった補助的な修正情報の伝達に限られることもわかる。実際, FSCI-3Dによる空間描画の分割と同定が最初からユーザの意図通りに行われ修正操作の必要がない場合においては, 2回の空間描画動作のみで多様な3次元図形プリミティブの入力が実現されることになる。

ここに提案した, 空間描画による3次元図形プリミティブ入力インタフェースを実際実現するためにはFSCI-3Dの実現が不可欠である。また, このインタフェースが実際に効率的に機能するかどうかはFSCI-3Dの同定性能によるところが大きいと予想される。本論文では, 次章以降で, FSCI-3Dの実現法について論じ, これを実際にVR環境に実装することによりその基本的な動作を確認する。

3. 2次元FSCIの処理概要

空間描画動作を空間曲線プリミティブとして同定するアルゴリズムFSCI-3Dを構築するための準備としてその前提となる従来の2次元FSCI⁽²⁾⁻⁽⁴⁾の概要を示す。

FSCIは汎用的な2次元手書き図形認識法の確立のために提案された幾何曲線プリミティブ同定法であり, 手書き描画曲線をもとにして, これをCAD図形の構成要素として重要な7種類の幾何曲線プリミティブ, 即ち, 図2に示す「線分」, 「円」, 「円弧」, 「楕円」, 「楕円弧」, 「開いた自由曲線」,

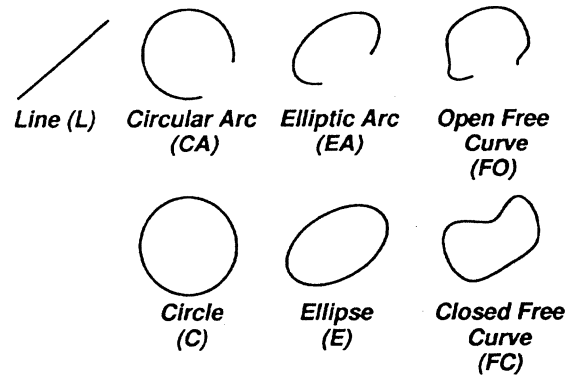


図2: CAD図形の構成要素として重要な7種類の幾何曲線プリミティブ

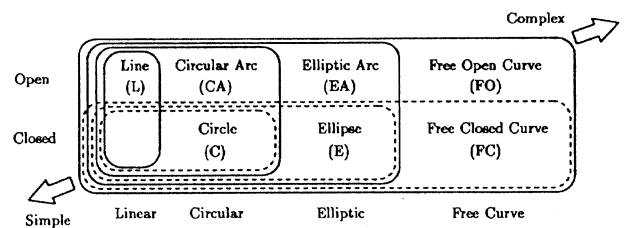


図3: 幾何曲線プリミティブ間の包含関係

「開いた自由曲線」の何れかとして同定する。この同定問題は, わずか7種類の幾何曲線プリミティブを弁別できればよいわけで, 一見, 簡単そうに思われる。しかし, プリミティブ間に存在する包含関係のために問題はそう簡単には解決されない。例えば, 「円弧」は「楕円弧」にその特別な場合として含まれ, 「楕円弧」はさらに「開いた自由曲線」に含まれる。また, 「円」は「円弧」がたまたま閉じたものと考えられ, 従って, 「円」は「円弧」に含まれることになる。このように考えると, これら7種類のプリミティブ間には図3に示す2重の包含関係が存在することに気がつく。同図で, 右上側が自由度の高い複雑なプリミティブ, 一方, 左下側が自由度の低い単純なプリミティブとなっている。ところで, 手書きでは当然正確な幾何曲線を描画することは不可能であり, 例えば図4の最上段に示すような手書き図形が描かれた場合に, これを, 「円弧」とみるか, 「楕円弧」とみるか, あるは「開いた自由曲線」とみるかが問題となる。ここでもし描画された図形の形状だけを厳密にみる限りにおいては全ての手書き描画は最も自由度の高い自由曲線と見なさざるを得なくなってしまう。

この問題を解決するために, FSCIでは, 描画形状とともに描画の適当さ(雑さ)の程度をも情報として活用することを提案している。つまり, FSCIは, 位置情報の曖昧さを許容した, いわゆるファジィな曲線モデルを導入し, 描画をその描き方の適当さ加減に対応した位置的な可能性の広がり

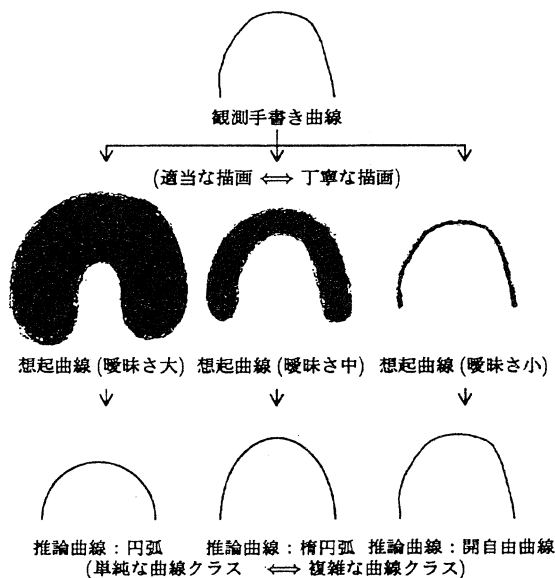


図 4: 手書き描画動作の違いによる解釈の多様性

を持ったものと考え、この可能性の広がりの中からもなるべく単純な曲線を認識することにより、書き手に自由度の低い単純なプリミティブを表現させる手段を与えた。これにより、書き手は、単純なプリミティブを表現したい場合には形状の正確な描画よりも適当で象徴的な描画動作によってその意図を表現し、一方、複雑なプリミティブを表現したい場合には丁寧にその描画形状の具体性を強調しながら描画することによりその意図を表現することができることになる。例えば、図4の歪んだ丸でも、適当に描けば可能性の広がりが大きくなり、その中から比較的単純な円弧が見つかることになり円弧が認識され、逆に丁寧に描けば可能性の広がり小さくなり、その中から円弧も楕円弧も見つからないため最も複雑な自由曲線が認識されることになる。

つまり、FSCIは、描画によって意図する形状を表現するとともに、描画の丁寧さの加減によって描画の具体性を表現して意図する幾何曲線プリミティブの種類をシステムに伝えることのできる図形入力インタフェースとして機能する。

このようなFSCIのより具体的な処理概要を図5に示す。書き手によって手書き曲線が描画されると、FSCIはその曲線の形状と描画動作をもとにしてファジィスプライン補間を行い、曖昧な手書き曲線の内部表現法であるファジィスプライン曲線を生成する。ここで、この曖昧さは描画の適当さ加減に応じて設定する。次にこのような内部表現をもとにして、描画をプリミティブ区間に分割する処理を行い、分割されたそれぞれのセグメントについてできる限り単純な幾何曲線プリミティブを選択するファジィ推論を行って書き手の意図した曲線種を同定し、その形状パラメータを求める。つま

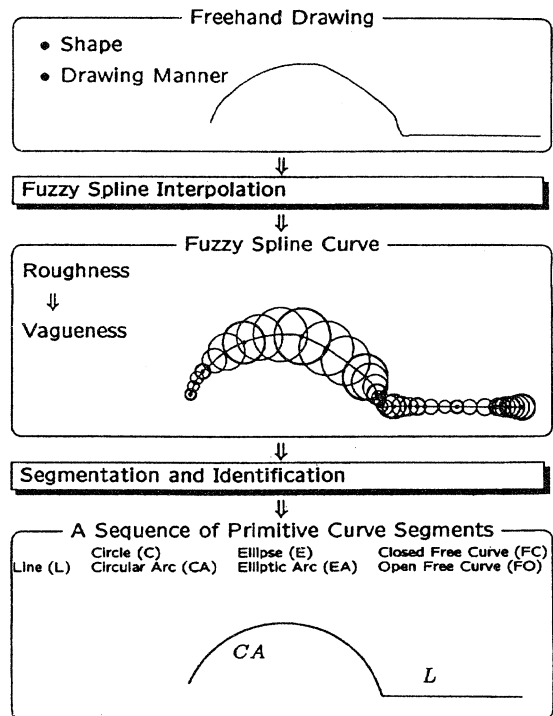


図 5: FSCI の処理概要

り、FSCIは一筆書きされた手書き曲線を7種類の幾何曲線プリミティブから構成される幾何曲線プリミティブ列として同定する。

3.1 同定処理

実際のFSCIでは描画をプリミティブ区間に分割する処理が同定処理に先立って行われるが、これについては後に述べることにし、ここではセグメントが一つの場合について考えることにする。

3.1.1 ファジィスプライン補間 2次元の手書き描画曲線は、実際にはペンとタブレットによってサンプリングされ離散的な点の時系列データ $p_i (i = 1, 2, \dots, k)$ としてシステムに入力される。FSCIではまずこれらの点列データのそれぞれ p_i を曖昧な点として図6に示すような円錐型メンバーシップ関数

$$\mu_{\tilde{p}_i}(v) = \left(1 - \frac{\|v - p_i\|}{r_{p_i}}\right) \vee 0 \dots \dots \dots (1)$$

をもつ^{*4}ファジィ点モデル $\tilde{p}_i (i = 1, 2, \dots, k)$ として表現する。このファジィ点モデル \tilde{p}_i は、点 p_i に位置する可能性が1であり、そこから離れるにしたがって存在の可能性が下がり、円錐底円の外に存在する可能性が0であることを示している。したがってこのファジィ点モデルでは円錐底円の半径 r_{p_i} が点の曖昧さを表すパラメータとなる。この曖昧さ r_{p_i}

^{*4} \vee はmax演算を表す。

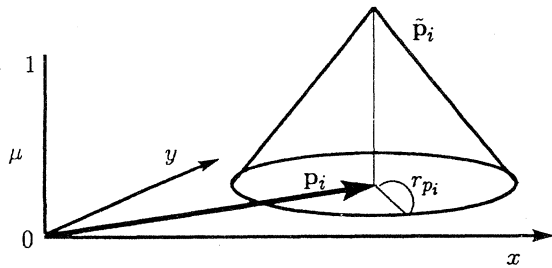


図 6: 円錐型ファジィ点

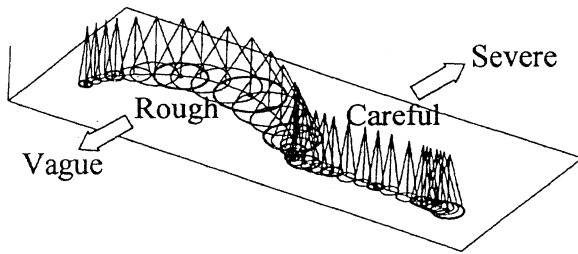


図 7: 円錐型ファジィ点の移動軌跡としてのファジィスプライン曲線

は本来的にはその点における描画の適当さ加減に応じて設定されるが、その簡便な方法の一つとして FSCI では描画の適当さ加減を描画動作の加速度に代表させ、各点での加速度の絶対値に比例した値の曖昧さ r_{p_i} を設定している。つぎにこのようなファジィ点列 $\tilde{p}_i (i = 1, 2, \dots, k)$ に対してファジィスプライン補間⁽³⁾を施すことにより曖昧な手書き曲線の内部表現となるファジィスプライン曲線を得る。このファジィスプライン曲線は、例えば図 7 に示すように曖昧さを描画の適当さ加減に応じて変化させながら移動する円錐型ファジィ点モデルの移動軌跡と見なすことができる^{*5}。

我々の提案しているファジィスプライン曲線のより具体的な表現はファジィ理論の根本的な原理である拡張原理まで遡って導くことができる。ここでは省略するが、この原理に基づけば、円錐型ファジィ点の重心結合がやはり円錐型ファジィ点となることを示すことができる⁽³⁾。即ち、ファジィ点 \tilde{p}_i を、円錐底円の中心の位置ベクトル p_i と円錐底円の半径 r_{p_i} を用いて

$$\tilde{p}_i = \langle p_i, r_{p_i} \rangle \dots \dots \dots (2)$$

と表記することにすれば、これらの線形結合は

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n k_i \tilde{p}_i &= \sum_{i=1}^n k_i \langle p_i, r_{p_i} \rangle \\ &= \left\langle \left(\sum_{i=1}^n k_i d_i \right), \left(\sum_{i=1}^n |k_i| r_{p_i} \right) \right\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

と求められる。ところで、通常のスプライン曲線は制御多角形の頂点 d_i の重心結合として

$$s^n(u) = \sum_{i=0}^{L+n-1} d_i N_i^n(u) \dots \dots \dots (4)$$

表現される⁽⁷⁾。ただし、ここで $N_i^n(u)$ は正規化 B スプライン関数である。したがって、この制御多角形の頂点を円錐型ファジィ点 \tilde{d}_i で置き換えることにより、ファジィ点の重心結合としてのファジィスプライン曲線を

$$\tilde{s}^n(u) = \sum_{i=0}^{L+n-1} \tilde{d}_i N_i^n(u) \dots \dots \dots (5)$$

という形で定義することが可能となる。

3.1.2 幾何曲線プリミティブの同定 ファジィスプライン曲線によって描画動作が内部表現されると、図 8 のように、ここからなるべく単純な幾何曲線プリミティブを推論しようとするファジィ推論を実行し、幾何曲線プリミティブのクラスとその形状パラメータを同定する⁽⁴⁾。ここではファジィ入力に対するファジィ推論が行われるため、必然的にその結果得られる幾何曲線クラスも離散的なファジィ集合として得られる。これは具体的には 7 種類の幾何曲線プリミティブの各々に 0 から 1 の範囲のグレード値が付与されたものとして得られる。さらに形状パラメータは 7 種類の幾何曲線プリミティブのそれぞれについて全て同定される。この同定結果は、グレード値によって順序づけされた同定結果の候補集合と見なすこともできる。

幾何曲線プリミティブの同定処理の具体的な流れは図 9 に示すようにやや複雑ではあるが、「可能性評価」と「曲線クラス推論」の二つの段階の処理に分けて考えることができる。まず最初の可能性評価の処理では、ファジィスプライン曲線を基にして、三つの仮説ファジィモデル、即ち「線形ファジィモデル」、「円形ファジィモデル」、「楕円形ファジィモデル」を構成する。つぎに、これらの仮説モデルと元のファジィスプライン曲線とのマッチングの度合いをファジィ測度⁽⁶⁾の一種である可能性測度⁽⁶⁾に基づいて評価して、それぞれ「線形性」、「円形性」、「楕円形性」を 0 から 1 の値をもつ可能性値 p_{Linear} , $p_{Circular}$, $p_{Elliptic}$ として算出する。またこれとは別に曲線の閉じている可能性値 p_{Closed} をやはり可能性測度を用いて算出する。つぎに後半の曲線クラス推論処理では、算出された四つの可能性値をもとに最も単純な幾何曲線プリミティブを選択しようとするファジィ推論を行い 7 種類のプリミティブのグレード値をやはり 0 から 1 の範囲の実数値として算出する。

^{*5} 図中ではファジィスプライン曲線を離散的な円錐型ファジィ点列として図示しているが、実際には式 (5) のように連続モデルとして構成される。

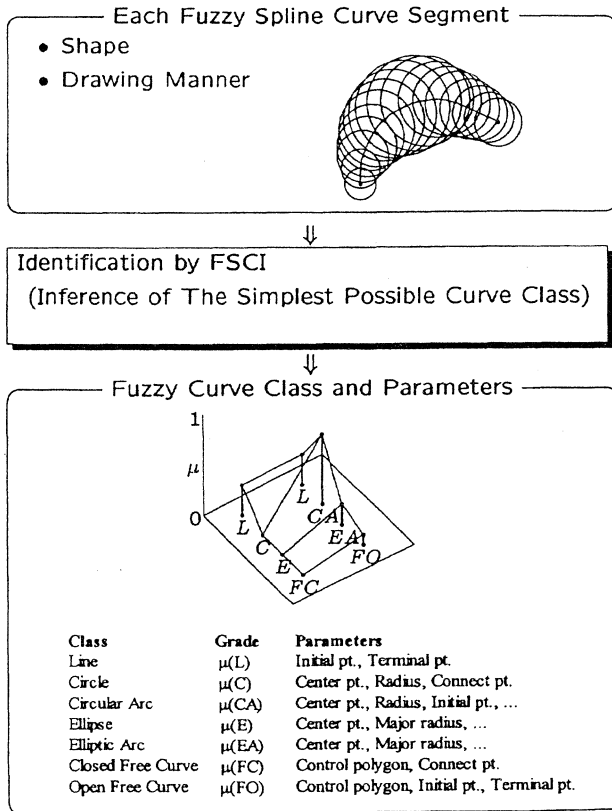


図 8: 幾何曲線プリミティブの同定

以上の処理により、例えば図 10 に示すような、適当な描画では単純な円弧のグレードが高くなり、反対に丁寧な描画では複雑な開自由曲線のグレードが高くなるという同定特性が実現される。

a. 可能性評価 ここで可能性評価処理をもう少し詳しくみると図 11 のようになる。まずファジィスプライン曲線が与えられたら、なるべくこれを近似するように楕円形ファジィモデルを仮説ファジィモデルの一つとして構成する。図中では省略されているが、円形ファジィモデル、線形ファジィモデルについても同様に構成する。次にファジィスプライン曲線とそれぞれの仮説ファジィモデルが曲線全体に渡ってどの程度マッチングしているかを評価するために、ファジィスプライン曲線および各仮説ファジィモデル上から等距離間隔に一定個数 (n_{fmps} 個) のファジィ点を選出しそれをそれぞれのファジィマッチングポイントセット (FMPS) とする^{*6}。このとき、楕円形ファジィモデルの適合可能性値 $p^{Elliptic}$ は、ファジィスプライン曲線の FMPS と楕円形ファジィモデルの FMPS の対応するファジィマッチングポイント間から求められる n_{fmps} 個の適合可能性値の論理積として算出する。

^{*6} 図の例では、 $\{\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \dots, \tilde{s}_{n_{fmps}}\}$ がファジィスプライン曲線の FMPS, $\{\tilde{r}_1^{Elliptic}, \tilde{r}_2^{Elliptic}, \dots, \tilde{r}_{n_{fmps}}^{Elliptic}\}$ が楕円形ファジィモデルの FMPS を表している。

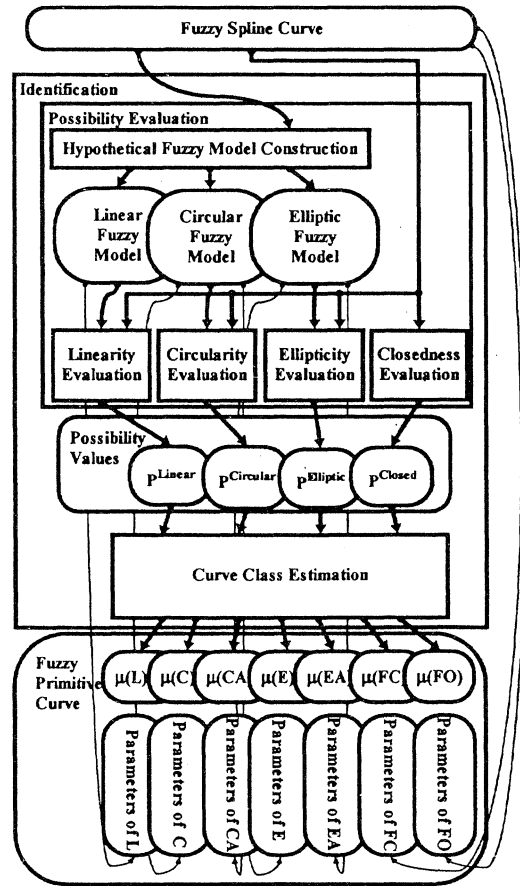


図 9: 幾何曲線プリミティブ同定処理の具体的な流れ

$p^{Circular}$ および p^{Linear} についても同様に算出する。

上述の仮説ファジィモデルの具体的な構成に際して、我々是有理型 Bézier 曲線を拡張した有理型ファジィ Bézier 曲線としてこれら表現することを提案している⁽⁴⁾。有理型ファジィ Bézier 曲線はファジィスプライン曲線と同様にファジィ点の重心結合表現となっているため円弧、楕円弧といった二次曲線のファジィモデルを容易に表現することができる^{*7}。

例えば楕円形ファジィモデルは以下の手順で構成される。図 12(a) に示すように、まず、ファジィスプライン曲線の始点 \tilde{q} を第一ファジィ代表点 \tilde{a}_0 として選出する。次に、ファジィスプライン曲線上で \tilde{a}_0 から最も直線距離の遠いファジィ点を第二ファジィ代表点 \tilde{a}_1 として選出する。さらに、 \tilde{a}_0 から \tilde{a}_1 に至るファジィスプライン曲線上の点でのうち直線 $\tilde{a}_0\tilde{a}_1$ から最遠に位置するファジィ点を第三ファジィ代表点 \tilde{f} として選出する。最後にファジィスプライン曲線の頂点が成す曲線上から三つのファジィ代表点に重ならないように適当な点を選択し、これを補助代表点 p とする^{*8}。ここで、 \tilde{a}_0 と \tilde{a}_1 のファジィ中点 $\tilde{m} = (\tilde{a}_0 + \tilde{a}_1)/2$ を求めて、直線 $\tilde{f}\tilde{m}$ と p を

^{*7} 曲線のファジィモデル化を行う場合には重心座標表現は重要であり、たとえば楕円弧を中心座標、長径、短径といったパラメータで表現するとファジィ化は容易に行えない。

^{*8} この点はファジィ点ではない通常の点であることに注意する。

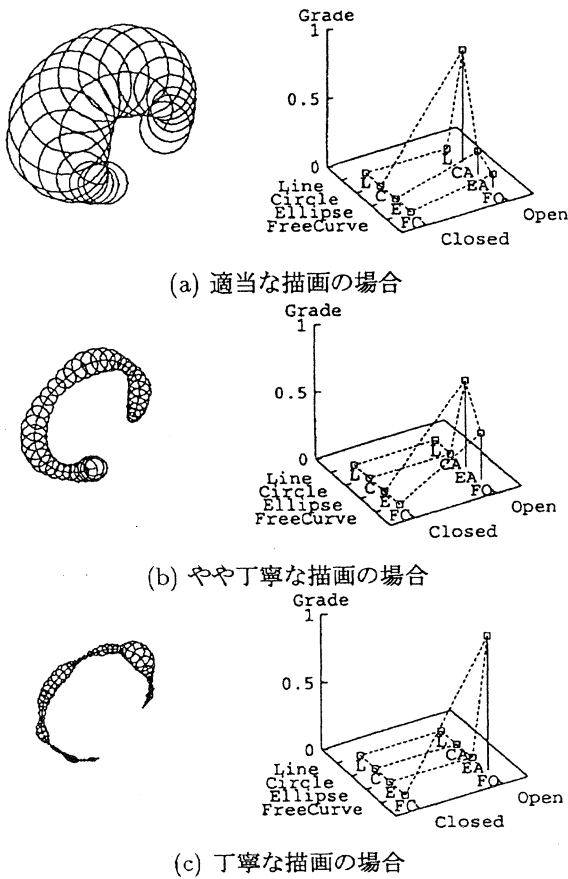


図 10: 描画動作の違いに起因する生成ファジيسプライン曲線とファジイ曲線クラス同定結果の違い

通り $a_0 a_1$ に平行な直線との交点 t を求めることにより, 重み係数 w を

$$w = \frac{(\alpha + \beta)^2 c^2 - \alpha(\alpha + 2\beta)d^2}{\alpha^2 d^2 - (\alpha + \beta)^2 c^2} \dots\dots\dots (6)$$

と決定する。ただし, α, β は, 点 t が線分 fm を内分する内分比^{*9}, c は pt 間の距離, d は $a_1 m$ 間の距離である。このとき, $\tilde{b}_0 = \tilde{a}_0$, $\tilde{b}_2 = \tilde{a}_1$ とし, また, \tilde{b}_1 を

$$\tilde{f} = \frac{w\tilde{b}_1 + \tilde{m}}{1 + w} \dots\dots\dots (7)$$

を満足するファジイ点とすれば, 元のファジيسプライン曲線と三つのファジイ代表点および一つの補助代表点で一致する楕円形ファジイモデルを

$$\tilde{b}(t) = \frac{B_0^2(t)\tilde{b}_0 + wB_1^2(t)\tilde{b}_1 + B_2^2(t)\tilde{b}_2}{B_0^2(t) + wB_1^2(t) + B_2^2(t)} \quad (\text{for } t \in [0, 1]) \dots\dots\dots (8)$$

および

$$\tilde{b}^c(t) = \frac{B_0^2(t)\tilde{b}_2 + (-w)B_1^2(t)\tilde{b}_1 + B_2^2(t)\tilde{b}_0}{B_0^2(t) + (-w)B_1^2(t) + B_2^2(t)} \quad (\text{for } t \in [0, t_e]) \dots\dots\dots (9)$$

^{*9} 図 12(a) のように外分点となっている場合は $\beta < 0$ となる。

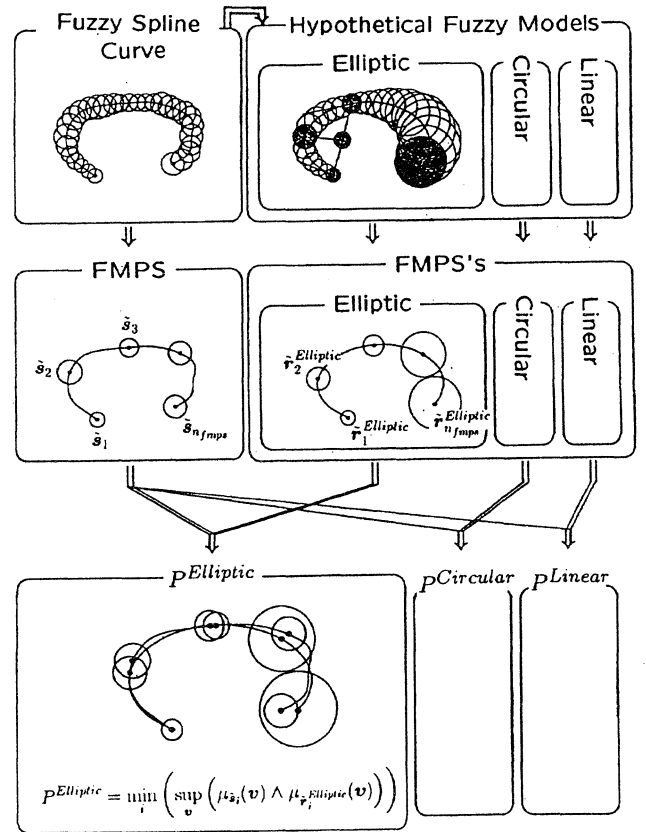
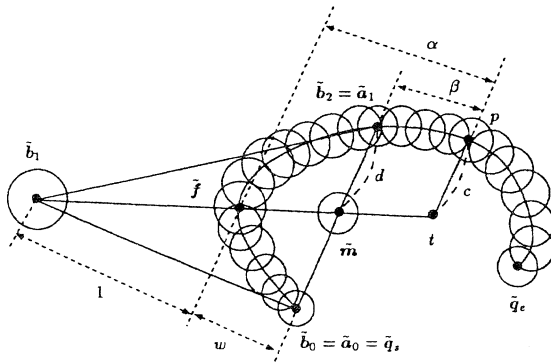


図 11: 可能性評価処理

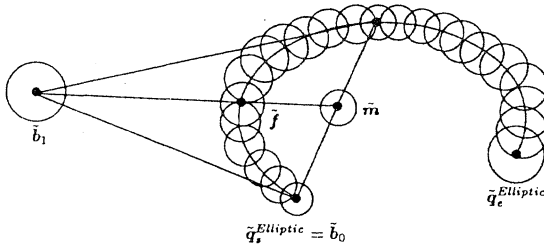
と構成することができる。但し, $B_i^2(t)$ は 2 次の Bernstein 多項式であり, 式 (8) は b_0 から b_2 に至る部分, 式 (9) は b_2 から $q_e^{Elliptic}$ に至る部分を与える。ここでファジイ終点 $q_e^{Elliptic}$ を与えるパラメータ値 t_e は, ファジيسプライン曲線における a_0 から a_1 に至る経路長と a_1 から q_e に至る経路長の比が, 楕円形ファジイモデルにおける b_0 から b_2 に至る経路長と b_2 から $q_e^{Elliptic}$ に至る経路長の比に一致するように決定する。

なお, 曲線がどの程度閉じているかという閉曲線性 p^{Closed} に関しては, 元のファジيسプライン曲線のファジイ始点 \tilde{q} , とファジイ終点 \tilde{q}_e の一致度を可能性測度で評価することにより直ちに得られる。

b. 曲線クラス推論 さて一方, 四つ可能性値が得られた後の後半の曲線クラス推論処理をもう少し詳しくみると図 13 のようになる。この処理は七つのファジイ論理式で実現され, 7 種類の幾何曲線プリミティブのグレード値がそれぞれ計算される。ここで $1 - P$ は P の否定, また \min 演算 \wedge は論理積を意味する。従って, 例えば第 1 行目は, 「線形の可能性があれば即座に線分である」ということを主張し, 例えば 5 行目は, 「線形の可能性がなく, 円形の可能性がなく, 楕円形の可能性があり, 閉じている可能性がなければ楕円弧であ



(a) ファジィスプライン曲線上の代表点



(b) (a) から構成する楕円形ファジィモデル

図 12: 楕円形ファジィモデルの構成例

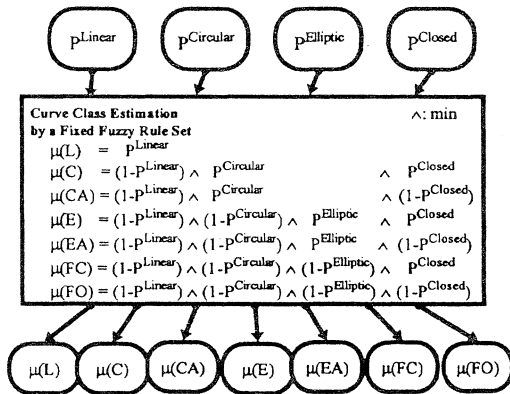
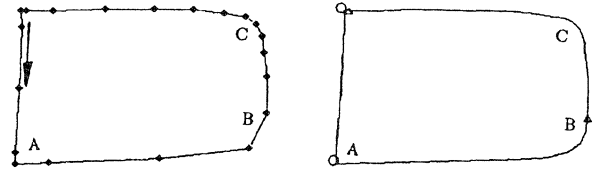


図 13: 曲線クラス推論処理

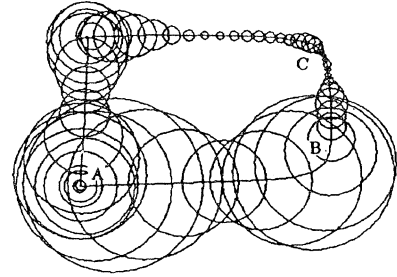
る」ことを主張していることに相当する。これらの論理式は全体として図 14 に示すファジィ推論を実現しており、結果としてなるべく単純なプリミティブを選択しようとするファジィ推論を実現していることになる。

3.2 分割処理

前述の幾何曲線プリミティブ同定に先立って分割処理が行われるが、ここでもファジィスプライン曲線モデルは本質的な役割を果たす。FSCI では、プリミティブの区切りを書き手が描画の停止動作によって明示的に指示するが、実際の描画において完全な停止を常に期待することは現実的ではない。したがって FSCI では、ファジィスプライン曲線をもと



(a) サンプルされた描画曲線 (b) 検出された確定的分割点 (○) と非確定的分割点 (△)



(c) ファジィスプライン曲線による内部表現

図 15: 描画動作の違いによるセグメンテーション結果の違い

に分析することによって停止動作の評価をファジィ的に行う (3). ここではその処理の詳細は省略するが、以下にその性質を定性的に示す。例えば、図 15 中の点 A は確実な停止動作として評価され確定的分割点として自動的に分割されるが、点 B の近傍では曖昧な点が少しずつ移動しているために不完全な停止動作として評価され、非確定的分割点として書き手に確認を求めることになる。一方点 C の近傍では点の移動が非常にゆっくりとしているにもかかわらず、点自体の曖昧さが小さいために確実に移動しているものと評価され、不要な停止点が検出されたりはしない。これは、単に描画速度の大小からは判断できないことであり、曖昧さを考慮したファジィ点の移動を評価することにより初めて実現される。

4. 3次元手書き曲線同定法「FSCI-3D」の提案

ここでは、2次元 FSCI を 3次元に拡張することにより 3次元手書き曲線同定法「FSCI-3D」を新たに提案する。FSCI は前章で述べたとおり重心座標表現を基本とするファジィスプライン曲線表現をベースとしているため、この 3次元への拡張は自然な形で容易に実現される。基本的には、(1)FSCI における 2次元の円錐型ファジィ点モデルを 3次元の超円錐型ファジィ点モデルに置き換える、(2)楕円形ファジィモデルの構成法を 3次元に対応させる、の 2点を考慮するだけで直ちに FSCI-3D のアルゴリズムを構成できる。この FSCI-3D は結果的に 3次元の仮想空間中の描画動作を FSCI と同様の 7種類の幾何曲線プリミティブとして同定することになるが、これらは 2.2 で示した 5種類の空間曲線プリミティブを全て含む。従って、ここで提案する FSCI-3D は 2.3 で提案

```

IF Drawing is Linear THEN Curve Class is Line (L)
IF Drawing is not Linear and Circular and Closed THEN Curve Class is Circle (C)
IF Drawing is not Linear and Circular and not Closed THEN Curve Class is Circular Arc (CA)
IF Drawing is not Linear and not Circular and Elliptic and Closed THEN Curve Class is Ellipse (E)
IF Drawing is not Linear and not Circular and Elliptic and not Closed THEN Curve Class is Elliptic Arc (EA)
IF Drawing is not Linear and not Circular and not Elliptic and Closed THEN Curve Class is Closed Free Curve (FC)
IF Drawing is not Linear and not Circular and not Elliptic and not Closed THEN Curve Class is Open Free Curve (FO)

```

図 14: 曲線クラス推論のファジィルール

した 3 次元図形プリミティブ入力インタフェースを実現するための空間描画同定法として十分なものとなる。

4.1 3 次元ファジィ点の定義と 3 次元ファジィスプライン曲線の構成

図 6 に示した 2 次元の円錐型ファジィ点を自然に拡張して、超円錐型メンバシップ関数によって 3 次元空間中のファジィ点を定義する。これは具体的には式 (1) の p_i を 3 次元位置ベクトルとみなすことにより直ちに得られる。なお、本論文では、以後、超円錐型メンバシップ関数の超底円を 3 次元空間中の球として表示することにより、図 16 のように 3 次元ファジィ点を図示することにする。

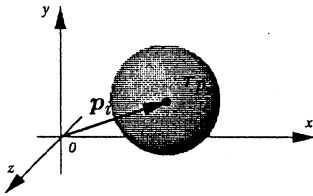


図 16: 3 次元ファジィ点モデルの超底円による図示

さてこのように 3 次元ファジィ点を超円錐型ファジィ点として定義すれば、これらの線形結合は、メンバシップ関数の頂点座標を表す位置ベクトルの次元が 3 次元となることを除き、式 (3) と全く同じ形式で求められ、結局図 17 に示すような 3 次元ファジィスプライン曲線も式 (5) と同形式で定義されることになる。このことから、2 次元 FSCI のアルゴリズムはほぼそのまま形式的に 3 次元に拡張することができ、これにより FSCI-3D が構築されることになる。

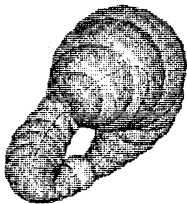


図 17: 3 次元ファジィスプライン曲線

4.2 3 次元楕円形ファジィモデルの構成に関する注意

4.1 で述べた通り、FSCI を形式的に 3 次元空間に拡張するだけでほぼ機械的に FSCI-3D は構築される。ただし、楕円形ファジィモデルの構成に関しては若干の修正が必要となる。これは、空間描画では楕円弧ファジィモデル構成のための三つのファジィ代表点と一つの補助代表点が一般に同一平面上に存在しないことによる。従って、FSCI-3D では、2 次元 FSCI と同様に補助代表点を求めた後、さらにこれを三つのファジィ代表点の頂点が構成する空間平面上に垂直射影し、これを新たに 3 次元楕円形ファジィモデルの補助代表点として採用することにより問題を解決する。

5. 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェースの試作

ここでは、4. で提案した FSCI-3D のアルゴリズムを没入型 VR 環境中に実装することにより、その 3 次元手書き曲線同定アルゴリズムとしての動作を確認する。また、FSCI-3D に若干の修正作業用ユーザインタフェースを付加することにより、簡易的な 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェースを試作して、これが直感的なヒューマンインタフェースとして動作することを示す。

5.1 没入型 VR 環境

FSCI-3D では書き手がその意図を空間中の描画動作として表現する。従って、FSCI-3D を実装するためには書き手が意図どおり自由に空間に描画できるような環境が必須となる。そのため、我々は、FSCI-3D を没入型 VR 環境中に構築することにした。没入型 VR 環境は図 18 のようにグラフィックスワークステーションに接続されたヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD) と空間入力デバイスから構成されたシステム上に実現される。ユーザの描画動作は、空間入力デバイスによって 3 次元空間中の点の時系列データとしてサンプリングされる。一方、ユーザの描画動作、システムの処理結果、およびユーザの頭の位置および姿勢の変化に対応して、グラフィックスワークステーションが仮想空間の状態をリアルタイムに更新しつつ、HMD に奥行き感のある立体画像として表示する。これにより、ユーザはあたかも仮想空間中に入り込んだように知覚することになり、空間入力デバイスに関連付けられた仮想ペンによって空間に描画しながら同時に

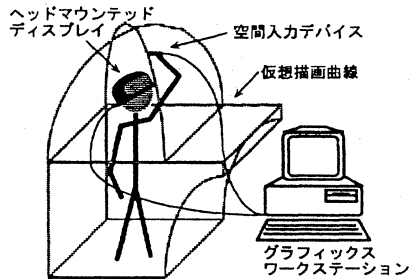


図 18: 没入型 VR 環境のシステム概念図

その描画動作に伴って生成されてゆく描画軌跡を自分の周囲に立体的に視認することが可能になる。さらに仮想空間中に存在している仮想的なオブジェクトに直接的に働きかけたりすることも可能になる。

5.2 FSCI-3D の実装

グラフィックスワークステーション上に C 言語を用いて FSCI-3D のアルゴリズムを実装し、その動作を確認した。図 19 に FSCI-3D による空間描画曲線の同定例を示す。図 19(a) は適当で象徴的な動作によって円を意図した描画を行った場合である。このとき、描画の適当さを反映した曖昧さの大きなファジィスプライン曲線が生成され、これから比較的単純な空間曲線プリミティブである円 (C) が同定されているのがわかる。一方、同じような描画形状でも、図 19(b) は形状の具体性を強調した丁寧な描画を行った場合であり、このときは曖昧さの少ないファジィスプライン曲線が生成されることにより複雑な閉自由曲線 (FC) が同定されるのがわかる。このように、FSCI-3D は、2 次元 FSCI の性質を継承しており空間描画同定法として機能することが基本的に確かめられた。

5.3 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェースの試作

FSCI-3D をヒューマンインタフェースの中核技術として利用することを考えた場合、誤同定に対する対策ができなければ実用的ではない。FSCI-3D は 2 次元 FSCI と同様にファジィ推論に基づいた同定を行っているため誤同定に対しても柔軟に対応できる。第一に、空間描画の分割に関していえば、3.2 で述べたように、FSCI-3D は描画における停止動作の厳密さに応じて確定的な分割点とともに非確定的な分割候補点をも検出して提示することができる。一方、空間描画の同定に関しても、同定結果が 3.1.2 で述べた離散のファジィ集合として得られるため、次候補選択に即座に対応することができる。これを確認するために、実際に FSCI-3D に分割点を修正するユーザインタフェースと同定された空間

曲線プリミティブの次候補選択のためのユーザインタフェースを付加することにより、簡易的な 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェースを試作した。図 20 にその動作例を示す。FSCI-3D は (a) のように入力された描画曲線をもとに (c) のように確定的分割点 (図中では球によって表示) と非確定的分割点 (図中では正四面体で表示) を提示する。ユーザが必要に応じて非確定的分割点をペンでクリックすることにより確定的分割点を (d) のように決定すると、FSCI-3D はこの分割に基づいて各セグメントの同定を行い、それぞれの第一候補を (e) のように提示する。ユーザはここでまた、必要に応じて各セグメントの候補をペンでクリックすることにより次候補選択を行って、最終的に (f) のように所望の空間曲線プリミティブ列を得ることができる。

6. むすび

本論文では、空中にデッサンするような直感的な操作によって直接的に 3 次元設計を行うことを目的として、空間描画動作同定に基づく 3 次元図形プリミティブ入力 CAD インタフェースの基本的なアイデアを提案した。また、このインタフェースを実現するための中核技術として必須となる 3 次元手書き曲線同定法「FSCI-3D」を導出し、さらのそれを没入型 VR 環境に実装することによりその基本的動作を確認した。

我々は、本論文の結果が、空間描画動作同定に基づく 3 次元図形プリミティブ入力 CAD インタフェースの実現可能性を十分示唆しているものと考えているが、これを実証するためには、今後、(1) 平面描画と空間描画における人の描画特性の微妙な違いとそれに対する適応、(2) 同定された空間曲線プリミティブの形状パラメータに対する自動丸め処理、(3) 同パラメータに対する微調整のためのユーザインタフェース、(4) スワイプ操作による 3 次元図形プリミティブ生成の実装、等についてさらに検討する必要がある。

謝辞 本研究の一部は平成 9 年度特定研究経費「仮想現実環境を利用した人間の認知・動作特性に関する研究」による。

文献

- (1) 清川清, 竹村治男, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和, 両手操作を用いた仮想物体モデラ VLEGO, 電子情報通信学会論文誌 (A), J80-A, 9, (1997), pp.1517-1526.
- (2) S. Saga and H. Makino, Fuzzy Spline Interpolation and Its Application to On-Line Freehand Curve Identification, Proc. of 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems, IEEE, (March, 1993), pp.1183-1190.
- (3) 佐賀聡人, 牧野宏美, 佐々木淳一, 手書き曲線モデルの一構成法 — ファジィスプライン補間法 —, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J77-D-II, 8, (1994), pp.1610-1619.

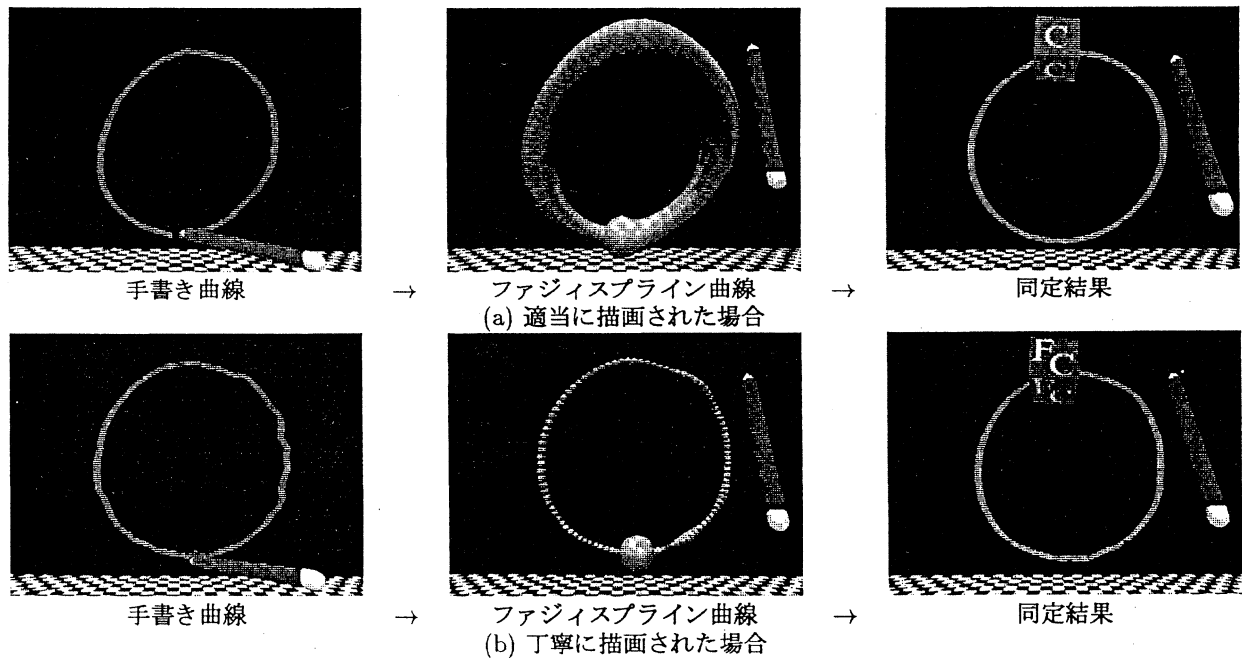


図 19: FSCI-3D の動作例

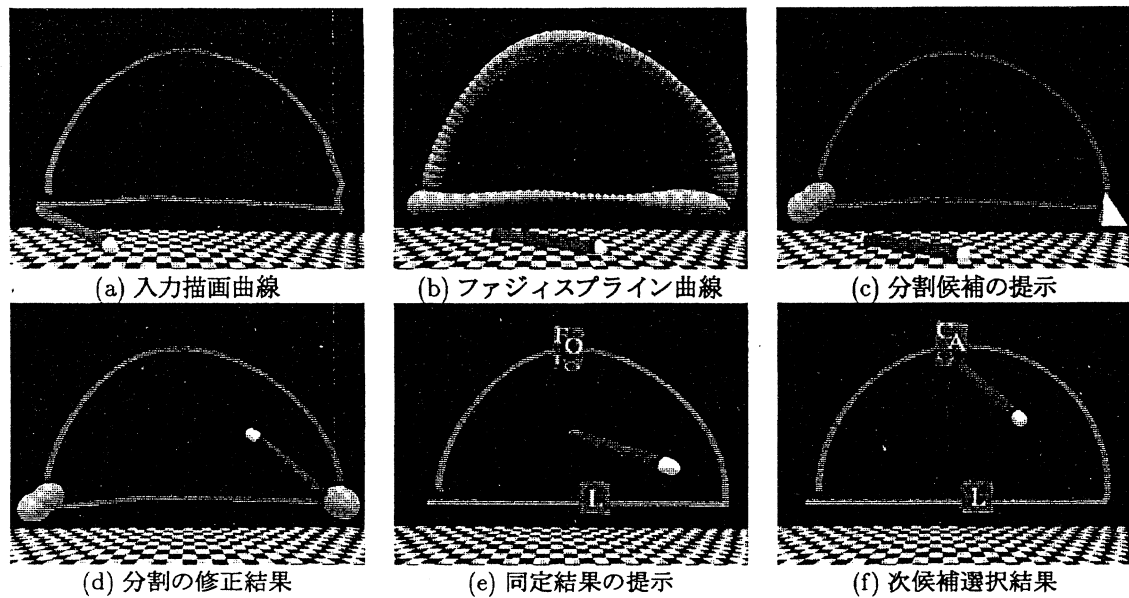


図 20: 簡易的な 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェースの動作例

- (4) 佐賀聡人, 牧野宏美, 佐々木淳一, ファジースプライン曲線同定法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J77-D-II, 8, (1994), pp.1620-1629.
- (5) 佐賀聡人, 佐々木淳一, ファジースプライン曲線同定法を用いた手書き CAD 図形入力インタフェースの試作, 情報処理学会論文誌, 36, 2, (1995), pp.338-350.
- (6) L. A. Zadeh, Fuzzy Sets As a Basis for a Theory of Possibility, Fuzzy Sets and Systems, Vol.1, 1, (1978), pp. 3-28.
- (7) G. Farin, Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A Practical Guide, Academic Press, Inc. (1988).
- (8) S. Saga, A Freehand Interface for Computer Aided Drawing Systems Based on the Fuzzy Spline Curve Identifier, Proc. of 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, (October, 1995), pp.2754-2759.
- (9) 佐々木聡, 佐賀聡人, 空間描画動作同定に基づく 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェース, インタクション'98 研究会資料, 情報処理学会, (1998-03), pp.81-84.

薄膜・微粒子の構造と磁気抵抗，磁性及び超伝導

上田 勇治^{*1}, 松田 瑞史^{*1}, 近澤 進^{*2},
酒井 彰^{*1}, 池田 正二^{*1}

Magnetoresistance, Magnetism and Superconductivity for Thin Film and Fine Particle Structures

Yuji UEDA, Mizushi MATSUDA, Susumu CHIKAZAWA,
Akira SAKAI and Shoji IKEDA

(論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

The development of electronics owes to much to the study of material science. The multilayered films and fine particles with thickness and size controlled in nano order scale have attracted much attention. Co-Cu multilayers and granular heterogeneous metastable alloys are prepared by electrodeposition and liquid rapid quenching. BaTiO₃, PbTaO₃ and epitaxial Nb thin films are prepared by electron beam method. The magnetism, magnetoresistance effect and superconductivity depended on the structure have been investigated for multilayers, epitaxial films, dielectric oxide films and nanogranular alloys produced by the various method.

Keywords: Magnetoresistance, Magnetism, Superconductivity, Multilayer, Granular alloy,
Electrodeposition, Dielectric film

1. 研究の概要

近年のコンピューター，エレクトロニクスの著しい発達はその基礎となる物質工学の発展に負うところが大きい。最近では，特に薄膜の結晶成長においては，高度に進んだコンピューター制御技術等の発展に伴ってナノオーダー即ち原子単位の制御で原子を一層つつ人工的に積層させる事が可能となりつつある。Å単位で膜厚，粒径を制御した半導体，金属人工格子や多層膜及微粒子分散型非平衡合金などもその一例である。

このようにして物質を超微細化，薄膜すると通常のbulkの結晶で得られている物性とは全く異なる性質を示し，物性物理学上の学術的興味ばかりでなく半導体デ

バイス，超伝導，センサーなど工学的見地からも最近強い関心を集めている。

強磁性-非磁性原子との組み合わせによる Fe-Cr, Co-Cu 等の金属多層薄膜は従来観測されていた磁気抵抗効果よりも極端に大きな抵抗変化が観測され磁気ヘッド，センサー材料として実用的な面からも注目されている。

また，強磁性超微粒子や微粒子分散型合金は高透磁率，磁気抵抗，超常磁性やランダム磁性等の点からも興味深い物性を示す。

以上の観点に立ち，以下では，1) 気相からの従来の方法とは全く異なる電気化学的電析法によるCo-Cu多層膜及び非平衡合金膜の製作とその構造と磁気抵抗

2) 電子ビーム法により作製されたエピタキシャルNb膜の超伝導特性 3) 液体急冷法により作製されたCo-Cuグラニューラ合金の磁気抵抗 4) 誘電体BaTiO₃, PbTaO₃膜の構造とその特性について，その研究の概略を説明する。

*1 電気電子工学科

*2 材料物性工学科

2. 電析法による強磁性・非磁性多層薄膜の製作とその磁気抵抗効果

2.1 はじめに

真空技術や計算機制御技術の発展に伴って最近の材料開発においては著しい進展が見られる。例えば、高真空下で結晶成長過程を原子レベルでコントロールし、物質を創製しようとする試み、即ち、多層構造薄膜や超微粒子析出型合金等もその一例といえる。このような状態における物質の物性は、一般の結晶と著しく異なる物性を示し、基礎物性及び応用両面にわたり活発に研究されつつある。

1988年、FeとCrからなるFe/Cr多層膜について、Co/Cu、Fe-Ni/Cu等の膜において、従来から観測されていた磁気抵抗効果に比べ、桁違いに大きな磁気抵抗が、非磁性層を介した強磁性層間の反強磁性的スピン配列に付随した現象として見い出され広範な研究が行われている^{(1),(2)}。これらの薄膜の製作は、主として気相からの成長であるが、これと全く異なる電気化学的液相からの電析法によって膜作製が可能である⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。この方法は通過電気量のみで膜厚制御が可能である等その他幾つかの利点を有している。本報告ではこれらの特徴を生かし、電析法によって製作したCo/Cu多層膜及び非平衡合金膜の構造と磁気抵抗についての研究の概略を述べる。

2.2. 磁気抵抗効果と薄膜

2.2.1 磁気抵抗

磁気抵抗効果 (Magnetoresistive, MR) とは物質の電気抵抗が磁場の印加により変化する現象を云う。この現象は強磁性体、半導体等の導電性の物質にはその大きさは別にして多少なりとも存在するものである。半導体では、伝導電子等のキャリアの移動が磁場によってローレンツ力を受け平均自由行程が長くなり、抵抗増加 (正のMR) を示すものとして知られている。

また、強磁性体では、磁化の配列状態に依存して現れ、その抵抗変化は電流方向に対する磁化の方向によって変わる。この起源はスピン-軌道相互作用によるものと考えられる。これは古くから磁気センサーとして利用されてきたが、この磁気抵抗比は約数%程度であり、高感度とは云えず、また電流と磁場の相対的方向に強く依存する方向性を持つものであった。

2.2.2 巨大磁気抵抗効果

これに対し最近、強磁性と非磁性原子との組み合わせで従来見られていた抵抗変化と比較して極端に大き

な抵抗変化が現れる、いわゆる巨大磁気抵抗効果 (Giant magnetoresistance) 略してGMRと呼ばれる現象が見つけられ注目されている⁽¹⁾。最近の超高真空技術やコンピュータの発達に伴ってナノオーダー即ち原子レベルでの原子層を積層させることが可能となってきたことにより、Co等の強磁性層とCu等の非磁性層を交互に積層させ、非磁性層Cuの膜厚を約10Å程度とすると大きな抵抗変化が見られる。これはCu層の適当な厚さになると強磁性層間のスピン配列が反平行になり (図1参照)、平行配列の状態にあるのと比して伝導電子の散乱確率が高くなり電気抵抗が増大する。即ち磁場をかけたときと無磁場のときとで電気抵抗に差が生じ、磁気抵抗変化が見られるものと考えられている。また、その値は従来の強磁性金属の磁気抵抗より非常に大きいということ、電流と磁場の相対角度に依存しない等方的性質を有し (図2参照)、

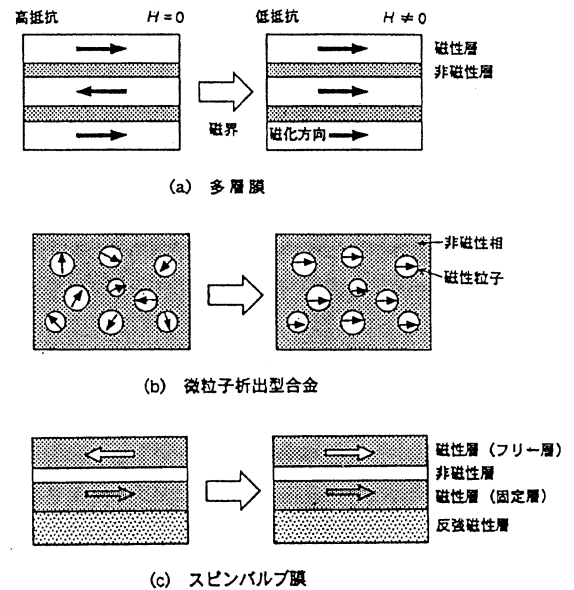


図1 多層膜、微粒子析出型合金及びスピバルブ膜の抵抗変化とスピン配列

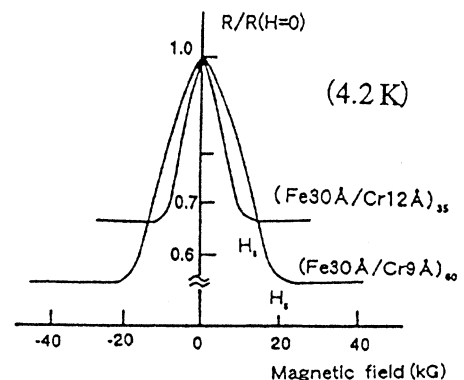


図2 Fe/Cr多層膜の磁気抵抗効果⁽¹⁾

磁場印加により常に減少する即ち負の抵抗変化を示すという従来のものとは根本的に異なる特徴を持っている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし、強磁性層と非磁性層との界面等の平滑性、層内の結晶性、構造等については明確でなく、またこれがどのような状態にあるとき強磁性層相互間において反強磁性的結合を示し、大きな磁気抵抗を生じさせる結果になるのかということについては明確とは云えない。

このような抵抗変化は非磁性体マトリックス中に強磁性体の微粒子を分散させたいわゆる微粒子析出型合金でも観察される^{(4), (7)-(10)}。(図1参照) 急冷薄帯やスパッタ薄膜等の過飽和固溶体や強制固溶体から相分離初期過程に観察されるものでグラニュラー型磁性体と呼ぶこともある。例として、強磁性原子Fe, Co, Niに対して、相互溶解度の非常に低いAu, Ag, Cu等の相分離系組合せ合金がある。これらの系では大きな磁気抵抗が観測される。

更に、層の種類を増加した状態(4層構造)においてもスピバルブと呼ばれる反平行スピン配列をとらせる方法がある⁽¹¹⁾。前述のサンドイッチ多層膜における反平行配列は非磁性金属層を介しての強磁性層間の交換結合による反平行スピン配列であったが、これと異なり非磁性層の厚さ等により、この層内の交換結合を切断した多層構造膜においても反平行スピン配列をとらせることが可能である。これは図1で示すように原理的には、隣接した反強磁性層により磁化反転のしにくい固定層(ピン層)と非磁性体で分離したもう片方の磁性層を軟磁性物質(フリー層)とすれば、この層は外部から低磁界で磁化反転する。フリー層と固定層の磁化方向が 180° 逆の反平行配列をとらせることが可能で、この時膜の抵抗は最大となる。

2.3 電着法による多層薄膜の作製

上記の強磁性、非磁性金属の多層膜、微粒子析出型グラニュラー合金膜、及びスピバルブ等は全て原理的に電着法によっても作製可能である⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。

電着法は適当な溶液や電着条件が見い出せば電位、電流の調節のみで自由に組成を変化させ得る。また膜厚に対しても、気相蒸着法による膜厚制御は蒸着時の膜厚を計測し、それをフィードバックして蒸発温度、速度等を調節して行うのに対し、電着による方法は電解液中のカソード電極面での金属イオンの還元反応を通過電流量により行う直接制御であるので原理的にも良い面を持っている。また普通の溶融法では合金化が困難なものでも合金化が可能であることもあるという利点を有している。

2.3.1 電着条件

電着のための基板は、大きさ $5\text{mm} \times 19\text{mm}$ でガラス基板上に銅を蒸着(膜厚 $100 \sim 150 \text{ \AA}$)したものであり、電着の電流密度は $0.1 \sim 10 \text{ mA/cm}^2$ (合金膜の場合は $1 \sim 10 \text{ mA/cm}^2$)であった。電着膜の厚さはCo-Ag, Co-Cu共に 3000 \AA であった。電解槽の浴組成はCo-Cuの場合は 1 l 中 $28\text{-}39 \text{ g CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $15\text{-}25 \text{ g CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $76 \text{ g Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$, 2 g NaCl であった。一方Co-Agでは 1 l 中 $16 \text{ g CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.1 \text{ g Ag}_2\text{SO}_4$, $76 \text{ g Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $2 \text{ g Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ であった。

2.3.2 多層構造薄膜の作製と磁気抵抗^{(3), (12)}

二種類以上の金属イオンを含む電解液において、金属の種類によってその析出電位が異なることを利用して、異種の金属原子を交互に積層させた多層構造の薄膜を作製することが可能である。即ち、矩形パルスの波高値によって組成を変化させること、通過電流量によって膜厚を調節することが可能である。

図3は浴の組成 $95\text{at}\% \text{Co}$, $5\text{at}\% \text{Cu}$ に対して電着膜の組成を電流密度の変化について示したものである。 0.4 mA/cm^2 ではCuの析出のみであるがこれ以上の電流密度ではCoCuの合金相が析出することになる。a及びb位置の電位(電流)を一定時間間隔で交互に繰り返すことにより強磁性金属層及び非磁性層の組成の異なる二層構造の多層膜を任意に作製することができる。

図4には強磁性Co-rich層のCo組成を変化させた場合のMR比をCu層の膜厚を変えた場合について示したものである。Cu層厚に対する第1ピークはCu厚 $13 \sim 18 \text{ \AA}$ で観察され、その最大値を示す組成は $\text{Co}_{86}\text{Cu}_{14}$ であり、そ

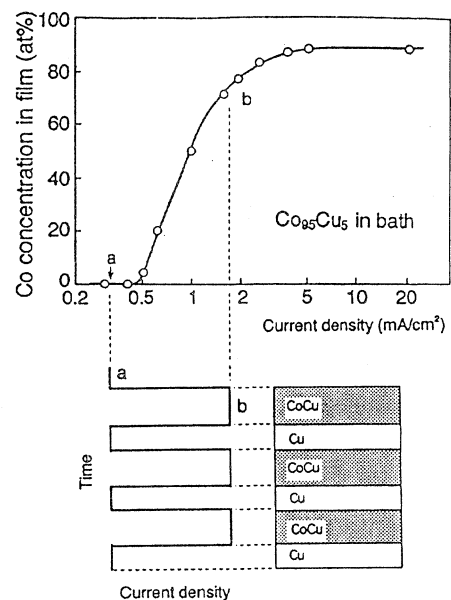


図3 電流密度と膜組成との関係

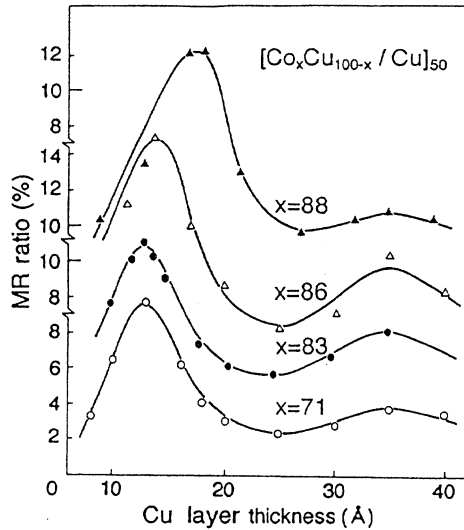


図4 種々組成をもつCo-rich層のMR比に及ぼすCu層の膜厚の影響

の第1ピークはCo組成の増加と共にCu膜厚の増加の方にシフトする。しかし、第2ピークは35 Å付近に見られこの値は一定である。

図5は、図4においてMRのピークを持つCu膜厚(14Å, 35Å)における試料についての $\Delta R/R_0$ 磁場依存性を見たものである。Cu膜厚14 Åにおいては $\Delta R/R_0$ は4kOeの磁場において飽和しないが、しかしM-H曲線においては磁場に対し飽和する傾向が見られる。これに対し、Cu膜厚35Åの場合には $\Delta R/R_0$ は磁場約1kOe程度で飽和し磁界に対する感度も高い。またこの膜厚においては弱磁場で磁気抵抗のヒステリシスが見られた。それに対応する磁化曲線(M-H曲線)は挿入図に示した。

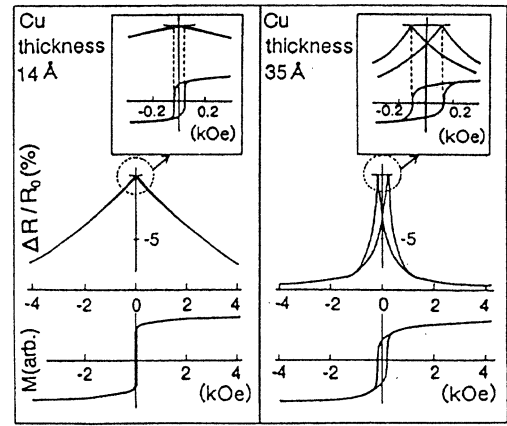


図5 $\Delta R/R_0$ の磁場依存性と磁化曲線との比較 $\text{Co}_{86}\text{Cu}_{14}(15\text{\AA})/\text{Cu}(14\text{\AA})$ と $\text{Co}_{86}\text{Cu}_{14}(15\text{\AA})/\text{Cu}(35\text{\AA})$ について

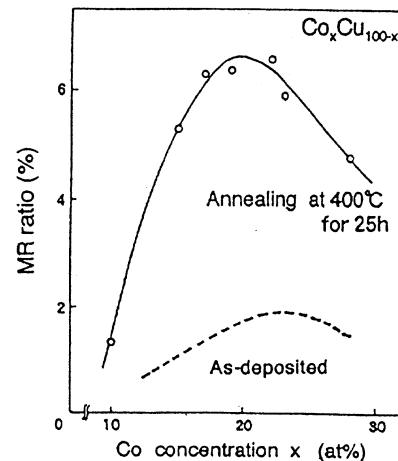


図6 Co-Cu合金膜におけるMR比のCo組成依存性

2.3.3 非平衡合金膜の作製と磁気抵抗 (4), (13)

普通の熔融法では融点の違いなどで合金化が困難なものでも電着法では溶液から低温過程での析出であるので合金化が可能となる場合がある。例えば、図3に示した一定電位(電流)に設定すれば、任意の組成の合金化が可能となる。但しそれがどのような内部状態でよくmixingしているかは組合せられる合金の種類や電着条件によって異なってくる。もし固溶型の組合せであれば熱処理することによりよく混合した合金化が可能であるし、相分離系の合金であれば非平衡状態の相が形成されていることとなる。即ち、電着膜特有の状態が形成されていることとなる。

図6はCo-Cu合金のMR(室温, 15kOe)をCo濃度に対して示したものである。作製時のMRは2%以下の値しか示さないが、熱処理(400°C, 25h)することにより

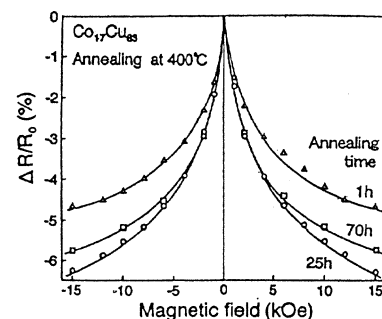


図7 $\text{Co}_{17}\text{Cu}_{83}$ 合金膜における $\Delta R/R_0$ の磁場依存性

17~22at%Co組成で約6%(室温)まで増加する。

図7には400°Cで熱処理した試料のMRの磁場依存性を示したものであり、400°Cで25hでは未だ飽和していない。

3. 超伝導薄膜の作製と評価

3.1 はじめに

近年の金属系超伝導体を用いたエレクトロニクスの発展は、多結晶Nb系薄膜を基礎としたトンネル接合デバイスの高信頼性に依るところが大きい。しかしデバイスの性能は、今やそれらを構成する超伝導薄膜中の不純物や結晶粒界での電子散乱・磁束トラップなど超伝導材料自体に起因する問題によって制限されるレベルに達しており、今後さらにデバイスの高性能化を図っていくためには、従来用いられてきた多結晶Nb系薄膜に代えて高品質な単結晶薄膜を用いる必要があると考えられる。例えば、SQUID（超伝導量子干渉デバイス）のワッシャー部にエピタキシャルNb薄膜を用いた場合には、磁束トラップに起因する低周波磁束雑音が低減しデバイス性能の向上が期待される。現在までのところ、単結晶Nb薄膜の作製とその結晶学的な性質についてはいくつかのグループから報告があるが⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾、SQUID応用に重要と思われる磁気的特性についてはあまり調べられていない。

ここでは、超伝導デバイスとしてSQUIDを想定し、その母材としてのNb薄膜の作製と評価について述べる。具体的にはエピタキシャルに成長させたNb薄膜については、磁場侵入長・臨界磁場・磁束雑音などの磁気的特性について評価を行った結果について述べる。

3.2 薄膜作製法

Nb薄膜は、dcマグネトロンスパッタリング法又は超高真空電子ビーム蒸着法を用いて、 α - Al_2O_3 単結晶のR面(1102)上に作製した。堆積時には、基板を300~740°Cの範囲で加熱することで、bcc構造のNb(100)配向膜をエピタキシャルに成長させることを試みた。スパッタリング法の場合、堆積時のAr圧力は3~20mTorrであり、堆積速度は60~200nm/min、膜厚は300nmとした。一方、電子ビーム蒸着法の場合は、蒸着中真空度が 10^{-9} ~ 10^{-8} Torr程度であり、堆積速度と膜厚はそれぞれ4~10nm/min、200nmである。なお、両法において、特に基板加熱を行わない場合についてもNb薄膜の作製を行い、加熱した場合に得られる薄膜との特性比較を行っている。

3.3 結果

3.3.1 結晶学的・電気的性質

図8(a),(b)に、基板温度 $T_s=500^\circ\text{C}$ においてスパッタ堆積して得られた薄膜のX線回折パターンと抵抗温度特性をそれぞれ示す。両図には、比較のため基板加熱を

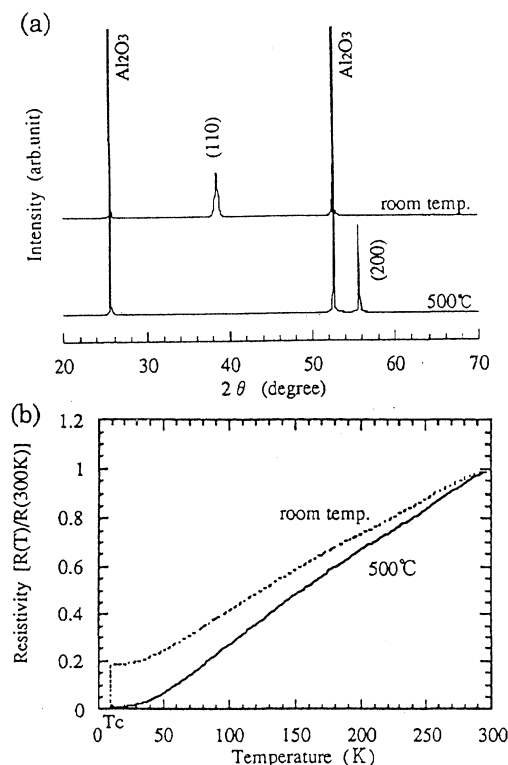


図8 Nb薄膜の(a) X線回折パターンと(b)抵抗-温度特性

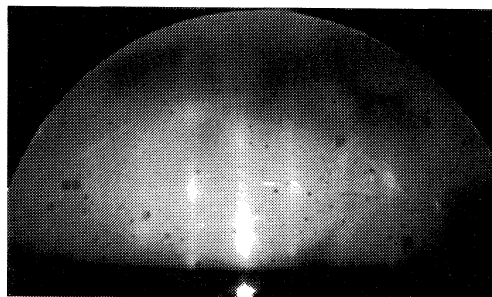


図9 エピタキシャルNb薄膜表面のRHEED像

行わず室温(R.T.)で作製した試料の特性についても示してある。基板加熱を行わないで作製した場合には(110)配向が支配的であるが、RHEED観察においてリングパターンが得られていることも併せて考えると、基板面内においてはランダムな方向に結晶粒が成長している多結晶薄膜であるといえる。一方、基板加熱を行った場合には、(100)面からの回折ピークのみが見られ、RHEEDパターンが回折点スポットを含むストリーク状のものとなっている(図9)ことを勘案すると、bcc構造のNb(100)配向膜がヘテロエピタキシャル成長しているといえる。このことはAFM観察の結果によっても裏付けられ、550°C以上の高基板温度で作製したNb薄膜につ

いては、非常に平坦で結晶粒界の認められない表面となっており、単結晶的なNb薄膜が得られることがわかった。又、この時、基板加熱により300Kと10Kの間の残留抵抗比 $RRR (\rho_{300K} / \rho_{10K})$ 値も20倍程向上しており、低温での電子散乱が低減されることが分かる。

3.3.2 磁気的性質

スパッタ堆積膜について、4.2Kにおけるその磁場侵入長をストリップライン共振法⁽¹⁷⁾により評価した。評価すべきエピタキシャルNb薄膜をグランドプレーンとして用い、その上に積層した200nmのSiO₂絶縁膜上に2本の平行ミアンダーのストリップラインを多結晶Nb薄膜からパターンニングして伝送ラインを作製した。この様な構造の薄膜共振器における基本共振周波数 f_r は、

$$f_r = \frac{1}{2\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $C/2$ は2本のストリップライン間のキャパシタンスである。又、 L は幅 w (10mm)、長さ l (約20mm)の各ストリップラインの自己インダクタンスであり

$$L = \frac{\mu_0 l}{w} \left[t_0 + \lambda \coth \frac{t}{\lambda} + \lambda_s \coth \frac{t_s}{\lambda_s} \right], \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 μ_0 は真空の透磁率であり、 λ_s はストリップライン(多結晶Nb薄膜)の磁場侵入長、 t 、 t_0 及び t_s はそれぞれグランドプレーン、絶縁層及びストリップラインの膜厚である。トラッキングジェネレータとスペクトルアナライザ、キャパシタンスメータを用いて測定した f_r, C の値とそこから算出されるグランドプレーン(エピタキシャルNb薄膜)の磁場侵入長 λ の値を表1に示す。表中には、グランドプレーンにも多結晶Nb薄膜を用いた場合についての結果も示してある。両者を比較すると、今回作製したエピタキシャルNb薄膜の磁場侵入長(53nm)は、多結晶薄膜のそれ(84nm)よりも小さいことがわかる。

次に、電子ビーム蒸着堆積膜に垂直に磁場を印加したときの磁化特性を、SQUID磁化率計を用いて調べた。図10には、4.5Kにおいて得られたエピタキシャル薄膜の特性を示す。図中には低磁場領域の結果を拡大して示してあるが、このデータから直接、下部臨界磁界 H_{c1} の値を読みとることは難しい。今、薄膜への磁束侵入開始磁界 H_p 以上の磁場領域において、マイスナー(完全反磁性)ラインからの偏差 dM が印加磁場の2乗(あるいは3乗)に比例すると仮定することで H_p を算出し、

表1 f_r, C (測定値) 及び算出される L, λ の値

Sample	C (pF)	f_r (MHz)	L (nH)	λ (nm)
Poly.Nb film	783	263	4.62	84
epi. Nb film	769	282	4.23	53

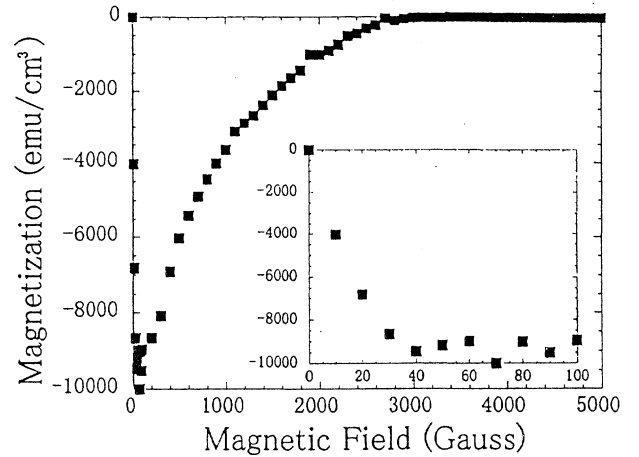


図10 エピタキシャルNb薄膜における磁化の磁場依存性

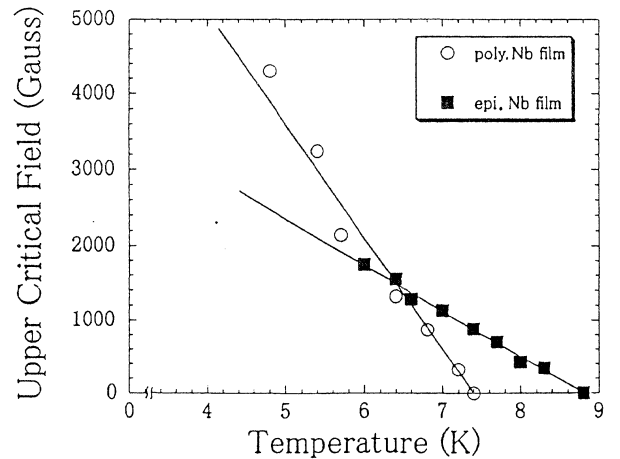


図11 上部臨界磁場(H_{c2})の温度依存性(T_c 付近)

さらに薄膜試料の幅(w)と厚み(d)からなる反磁場補正ファクター(d/w)^{-1/2}を乗ずることで H_{c1} 値を決定すると⁽¹⁸⁾、約650Gaussとなる。一方、上部臨界磁界 H_{c2} の値は2600Gauss程度と、多結晶薄膜のそれ(5000Gauss)よりも小さく、やや第1種超伝導体的な性質を帯びていることがわかる。

図11には、電子ビーム蒸着堆積膜について、上部臨界磁界 H_{c2} 値の T_c 付近での温度依存性を示す。エピタキシャルNb薄膜においては多結晶薄膜に比べてこの依存性が弱いことが見て取れるが、この傾きの大きさから以下の関係を用いてGinzburg-Landauのコヒーレンス長

$\xi_{GL}(0)$ を算出することが可能である⁽¹⁹⁾。

$$-\left. \frac{dH_{C2}}{dT} \right|_{T_c} = \eta_{H_{C2}}(T_c) \frac{\hbar}{2e} \frac{1}{\xi_{GL}^2(0)} \frac{1}{T_c}, \quad (3)$$

ただし、 $\eta_{H_{C2}}(T_c)$ は H_{C2} に関する強結合係数であり、トンネル接合等のデータより1.09と仮定した。算出されるエピタキシャル薄膜についてのコヒーレンス長の値は27nmとなり、多結晶薄膜についての値(16nm)よりも大きなものとなった。

最後に、まだ予備実験の段階であるが、dc-SQUIDと2次微分型グラジオメータを用いて4.2KでNb薄膜の磁束雑音を評価した。電子ビーム蒸着堆積膜を18mm径のグラジオメータ底面に固定しその磁束雑音を測定した。測定には通常のKetchen型のNb薄膜dc-SQUIDを用い、測定系は高透磁率メタル筒と銅で電氣的・磁氣的にシールドした。今までのところ、エピタキシャルNb膜と多結晶Nb膜の場合の結果で有為な差は見られておらず、測定された磁束雑音（ホワイト雑音レベルで $2.2 \times 10^{-5} \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、これは $8.4 \times 10^{-15} \text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ の磁場雑音に相当）は、殆ど外部からの磁束雑音成分であった。両Nb薄膜の磁束雑音の差を検出するためには更に厳密なシールド内において精度の良い実験が必要である。

以上のことから、Nbをエピタキシャルに成長させることで、単結晶的な薄膜を得ることができた。結晶学的・電氣的特性の他、磁氣的性質についても評価を行ったが、デバイス特にSQUIDに応用することを考えると、薄膜の磁束雑音特性についても更に詳細に調べていく必要がある。

4. 金属磁性微粒子系の巨大磁気抵抗効果⁽²⁰⁾

(磁性微粒子径分布の解析)

4.1 はじめに

巨大磁気抵抗効果(GMR)が金属人工格子だけでなく、非磁性金属中に磁性微粒子を析出させた合金(磁性グラニュー合金)においても観測されることが報告され^{(7),(8),(21)}、現在非常に注目されている。応用面では、市販の磁気ディスク装置にGMRヘッドがすでに用いられており、磁気センサーやメモリーへの実用化に向けた研究が進められている。これに対して基礎的な面ではGMRの起源という根本的な問題についてもいまだ統一的な見解は得られていない。磁性グラニュー合金系のGMRに限っても、磁性微粒子内部および非磁性金属と磁性微粒子の界面での「スピン依存散乱」とする説⁽²²⁾が現在のところ最も有力であるが、磁性微粒子か

らのポテンシャル散乱と、伝導電子のスピンと磁性微粒子の磁気モーメント間の双極子相互作用による磁気散乱とを起源とする説⁽²³⁾なども提案されている。これらはいずれも定性的には同様の結果を与えるため、定量的な評価に耐える精密なGMRの測定が必要になる。

本研究は磁性グラニュー合金系におけるGMRの定量的な解析の第一歩として、巨大磁気抵抗効果と磁性微粒子の粒径分布との関係を調べることを目的とする。

4.2 試料作製および実験方法

原料金属Cu(99.999%)とCo(99.99%)とをアーク炉で溶解し、単ロール法を用いてリボン状の $\text{Cu}_{88}\text{Co}_{12}$ 、 $\text{Cu}_{80}\text{Co}_{20}$ 合金を得た。ここでは、 $\text{Cu}_{88}\text{Co}_{12}$ 合金での結果についてのみ述べる。測定に用いた試料は作成したままの状態(as-quenched)、500°Cで10分、1時間、24時間それぞれ熱処理したもの4種類を用意した。

磁気抵抗は交流4端子法(80Hz)で室温において測定した。磁化はSQUID磁力計、磁化率は自作の相互誘導ブリッジを用いて測定した。

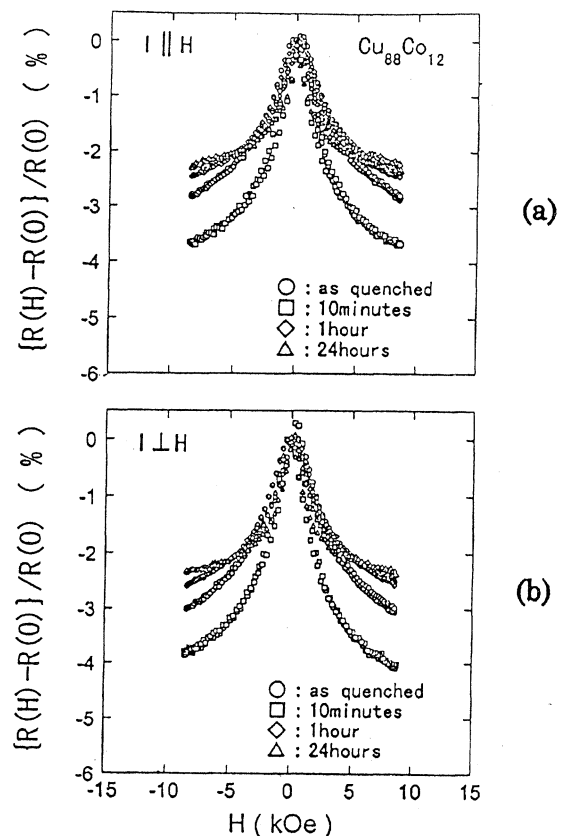


図12 $\text{Cu}_{88}\text{Co}_{12}$ 合金の磁気抵抗比 $\text{MR} = \{R(H) - R(0)\} / R(0)$ の外部磁場 H 依存性。(a)は電流 I と外部磁場 H が平行 ($I \parallel H$) の場合、(b)は垂直 ($I \perp H$) の場合の結果である。

4.3 結果

図12に室温で測定した $\text{Cu}_{88}\text{Co}_{12}$ 合金の磁気抵抗比の外部磁場依存性を示す。図12で、(a)は電流 I と外部磁場 H を試料の面内で長手方向に加えた場合 ($I \parallel H$)、(b)は I を長手方向に H を電流に垂直に加えた場合 ($I \perp H$)の結果である。MRは負で、電流と外部磁場の相対的な向きによらずほぼ等方的であるのがわかる。また、MRは装置の最大磁場 $H=8.5\text{kOe}$ においても飽和しない。これに対し、磁化曲線は $H \sim 5\text{kOe}$ で飽和する⁽²⁰⁾。MRの大きさはas-quenched試料 (○) よりも 500°C で10分熱処理した試料 (□)の方が大きくなっており、 $H=8.5\text{kOe}$ で約4%である。しかしながら、 500°C で1時間以上熱処理した試料 (◇, △)は逆にas-quenched試料 (○) よりも磁気抵抗比MRが小さくなっている。上はこれまでに報告されている結果と一致する^{(7),(8),(21)}。

4.4 考察

磁気抵抗効果と磁性微粒子径の分布との関係を明らかにするため、磁気抵抗比MRの外部磁場依存性を、

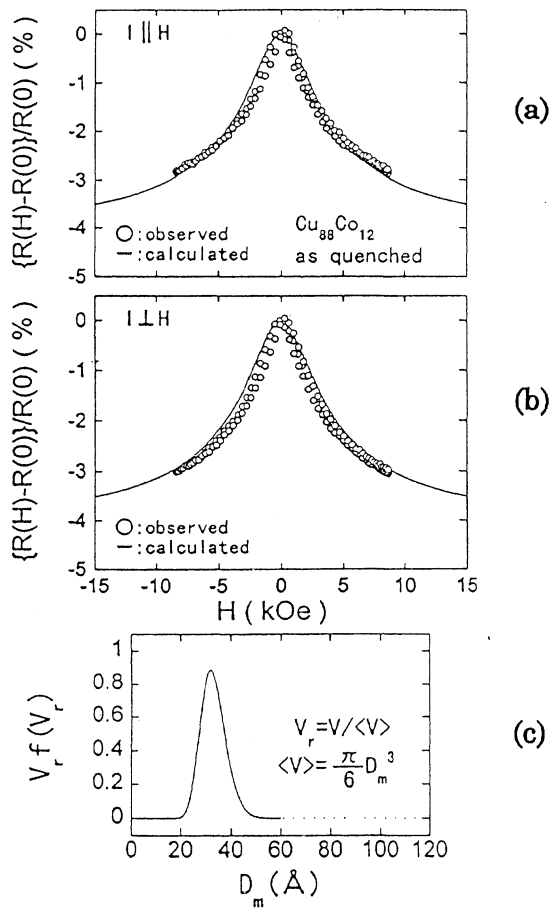


図13 $\text{Cu}_{88}\text{Co}_{12}$ 合金as-quenched試料の磁気抵抗効果。(a)は $I \parallel H$ の場合、(b)は $I \perp H$ の場合で(○)は実験結果、実線は解析結果を表す。(c)はCo粒子の分布を示す。

ZhanとLevyのモデル⁽²²⁾を用いて解析した。このモデルでは、スピン↑の電子とスピン↓の電子がそれぞれ独立に電気伝導を担う(2流体モデル)とし、磁気抵抗は磁性微粒子内部の不純物原子によるスピン依存散乱と磁性微粒子と非磁性母相との界面によるスピン依存散乱とによるとしている。また、磁気抵抗には超常磁性微粒子のみが寄与し、粒径の大きな強磁性粒子の寄与はないと仮定している。

粒子径の分布関数には対数正規分布関数を採用した。この関数は微粒子系の磁気的性質の解析に多く用いられており、実験結果をよく再現することが報告されている^{(24),(25)}。また、図12に示した熱処理によるMRの変化は主に超常磁性微粒子の平均粒径、分布幅、濃度が変化するためと考え、その他のパラメタは変化させないで解析した(MRに寄与する最大粒径は解析から求めた値、その他のパラメタは文献値⁽²²⁾を用いた)。

図13(a),(b)はas-quenched試料のMRの測定結果と解析結果とを示したものであり、図13(c)はこの解析で用いた粒子径の分布を表す。図13(a),(b)からこのモデルはMRの磁場依存性を良く表すことがわかる。同様の解析を熱処理をした試料のMRについてもを行い、熱処理による粒径分布の変化を求めた(図14)。図14から、熱処理に伴いCo微粒子の平均粒径は増加し、分布の幅も広

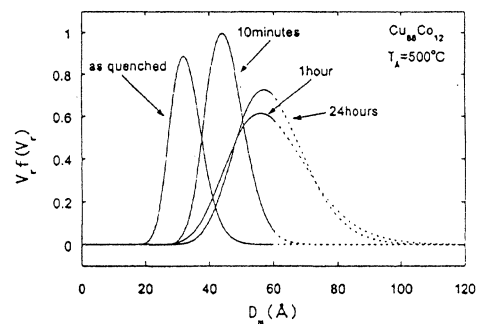


図14 $\text{Cu}_{88}\text{Co}_{12}$ 合金の熱処理によるCo粒径分布の変化

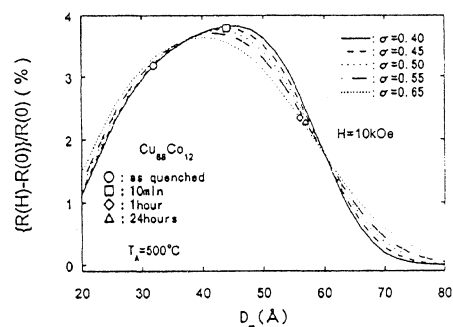


図15 Co粒子の平均粒径と磁気抵抗比の変化

がることになる。最後に、MRの平均粒径に対する依存性を図15に示す。この図から、本研究で用いた試料においては500℃で10分の熱処理を行った試料がほぼ最大のMRを与えることがわかる。このことは、図12の実験結果だけからではわからず、解析を行って初めて明らかになったことである。

5. 強誘電体薄膜の作製とその評価

5.1 はじめに

近年、電子デバイスの高集積化やセンサーの小型化に伴い、高誘電率で高い電気機械結合係数を持ち電気光学効果がある酸化物強誘電体BaTiO₃やPbTiO₃等の薄膜に注目が集まっており、応用を目的として数多くの研究が行われている^{(26),(27)}。これまで薄膜作成法には、反応性蒸着法、MO-CVD法等を用いていたが、これらの装置は高価で作製条件のパラメータが多く複雑であった。そのため、本研究では、取り扱いが容易である電子ビーム蒸着装置を用い、強誘電体BaTiO₃とPbTiO₃の薄膜合成を試みた。電子ビーム蒸着法では、薄膜作製時において、BaO（またはPbO）とTiO₂の蒸着速度が異なるため、形成膜上での組成比がターゲット試料とすれてしまうことがある。これを解決するために、蒸着方法、熱処理条件、基板材料を色々かえ、薄膜を作製した。

作製した薄膜の評価には、X線回折と顕微ラマン散乱を用いた。顕微ラマン散乱法では可視光をプローブとして集光し測定しているため、(1)マイクロ領域の局所評価ができる、(2)BaTiO₃やPbTiO₃等の透明な試料では表面だけでなく内部の評価ができることが特徴である。

5.2 試料作製および実験方法

薄膜作製条件を表2（BaTiO₃）と表3（PbTiO₃）に示す。両者とも粉末試料をターゲットとして用い、同じ電子ビーム蒸着装置で作製した後、良質の薄膜を得るために、温度と時間をかえ熱処理を行った。

表2 BaTiO₃薄膜の蒸着条件

Substrate	glass, Si(100) and Pt
Evaporation source	BaTiO ₃ powder (98%)
Electron beam gun	25kV 60mA
Pressure	1×10^{-5} Torr
Substrate temperature	room temperature
Film thickness	1 μ m
Annealing temperature	600~1100℃
Annealing time	1~11 h

表3 PbTiO₃薄膜の蒸着条件

Substrate	Si(100)
Evaporation source	PbTiO ₃ powder (99%)
Electron beam gun	10~20kV 15~60mA
Pressure	1×10^{-5} Torr
Substrate temperature	room temperature
Film thickness	0.5~4 μ m
Annealing temperature	400~1100℃
Annealing time	0.5~5 h

X線回折装置ならびにラマン散乱装置は、本学機器分析センター所属の装置を用いた。X線回折では、Cu管球で50kV150mWで、ラマン散乱では、空間分解能2 μ m、装置分解能2cm⁻¹でスペクトルの測定を行った。X線回折、ラマン散乱ともにBaTiO₃とPbTiO₃の粉末試料を評価の基準とした。

5.3 結果

5.3.1 BaTiO₃薄膜

典型的な例を図16（X線回折）、図17（ラマン散乱）に示す。図16、図17とも(a)は基準となるBaTiO₃粉末、(b)は作製直後、(c)はSi基板で熱処理後、(d)はPt基板で熱処理後、の結果である。熱処理条件として、温度を600~1000℃、時間を1~11hまで変化させたが、1000℃で1hの時に最良の薄膜が得られた。図16(b)で作製直後

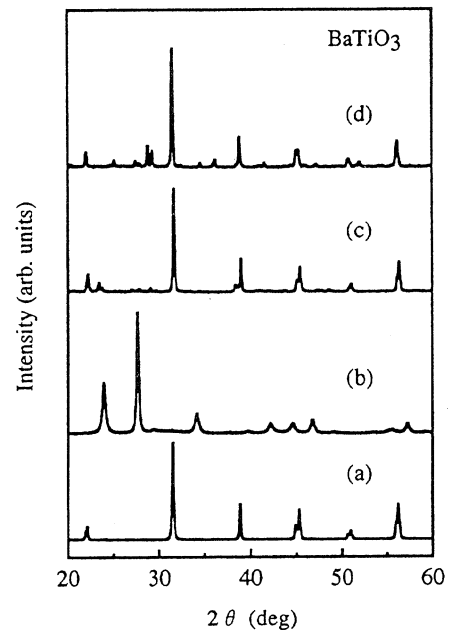


図16 BaTiO₃のX線回折パターン

(a) BaTiO₃粉末, (b)作製直後, (c)熱処理後（1000℃, 1h, Si基板）, (d)熱処理後（1000℃, 1h, Pt基板）

の膜では, 図16(a)と比較するとBaTiO₃の回折パターンが現れていない。これは, BaTiO₃が形成されずに, BaOとTiO₂に分離している状態であると思われる。図16(c), (d)とも基板の種類にかかわらず熱処理を施すと, 図16(b)で見られたピークは消失し, 粉末(a)と同じBaTiO₃の回折ピークが出現する。以上のことより, 熱処理によって原子の再配列・再結合が行われて, BaOとTiO₂に分離していたものが融合し, BaTiO₃が形成されることがわかった。さらに, 不純物からの回折ピークも小さいことから, 本研究で見いだされた作製条件で, 良質の膜が得られることがわかった。

顕微ラマン散乱のスペクトル図17においても, X線回折と同様の結果が得られた。作製直後図17(b)では, 粉末図17(a)と比較すると何も現れず, 熱処理を行うと図17(c), (d)ともBaTiO₃特有のシグナルが現れた。図17(c)での520cm⁻¹の鋭いピークは基板のSiからの, 図17(d)での780cm⁻¹のピークはPtからのシグナルに帰属された。そのため, 図17では基板と接する内部までの, 情報が検出されていることが明らかとなった。以上ラマン散乱の測定から, 熱処理された薄膜は2μmの局所領域においてさえ, 表面から内部にわたり均一なBaTiO₃となっていると結論された。

5.3.2 PbTiO₃薄膜

BaTiO₃と同じ装置を用いてPbTiO₃薄膜を作製し, X線回折とラマン散乱(図18)で評価を行った。図18中

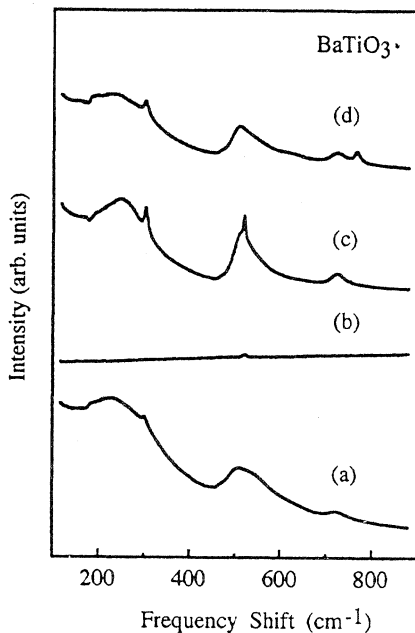


図 17 BaTiO₃のラマンスペクトル
(a) BaTiO₃粉末, (b) 作製直後, (c) 熱処理後 (1000°C, 1h, Si基板), (d) 熱処理後 (1000°C, 1h, Pt基板)

の(a)は基準となるPbTiO₃粉末, (b)は作製直後, (c)はSi基板で熱処理後, の結果である。BaTiO₃の場合と異なり, 最良の薄膜は600°Cで2hの熱処理の時に得られた。やはり, 作製直後(b)では粉末(a)と比較すると全く異なったパターンが現れ, 熱処理に伴いPbTiO₃特有のシグナルに変化した。PbTiO₃においても, 熱処理によって原子の再配列・再結合が行われて, PbOとTiO₂に分離していたものが, PbTiO₃へと再構成されることがわかった。

本研究において, 廉価な電子ビーム蒸着法でも良質の強誘電体薄膜を作製し評価することができた。

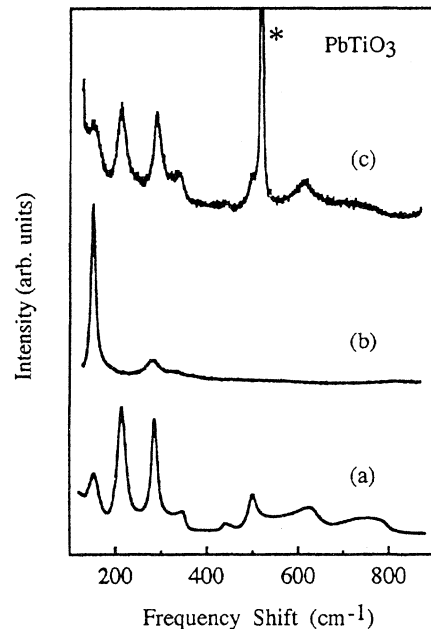


図18 PbTiO₃のラマンスペクトル
(a) PbTiO₃粉末, (b) 作製直後, (c) 熱処理後 (600°C, 2h, Si基板, *印は基板として用いたSiのシグナル)

おわりに

最後に, 本稿の内容は主として室蘭工業大学平成9年度特定研究費補助金により行われたものであり,

1., 2.は上田勇治, 池田正二, 3.は松田瑞史, 4.は近澤進, 5.は酒井彰が執筆した。

参考文献

- (1) M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friedrich and J. Chazelas, Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2472.

- (2) S. S. P. Parkin, R. Bhadra and K. P. Roche, *Pyhs. Rev. Lett.* 66 (1991) 2152.
- (3) Y. Ueda, N. Hataya and H. Zaman, *J. Magn. Magn. Mater.* 156 (1996) 350.
- (4) Y. Ueda and M. Ito, *Jpn. J. Appl. Phys.* 33 (1994) L1403.
- (5) Y. Ueda and N. Kikuchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32 (1993) 1779.
- (6) W. Schwarzacher and D. S. Lashmore, *IEEE Trans. Mag.* 32 (1996) 3133.
- (7) A. E. Berkowitz, J. R. Mitchell, M. J. Carey, A. P. Young, S. Zhang, F. E. Spada, F. T. Parker, A. Hutten and G. Thomas, *Phys. Rev. Lett.* 68 (1992) 3745.
- (8) J. Q. Xiao, J. S. Jiang and C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.* 68 (1992) 3749.
- (9) Y. Ueda and S. Ikeda, *Mater. Trans. JIM* 36 (1995) 384.
- (10) Y. Ueda, S. Ikeda, S. Moriwaki and M. Matsuda, *Jpn. J. Appl. Phys.* 35 (1996) L1059.
- (11) B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D.R. Wilhoit and D. Mauri, *Phys. Rev. B* 43 (1991) 1297.
- (12) Y. Ueda, T. Houga, A. Yamada and H. Zaman, *J. Magn. Soc. Jpn.*, in press.
- (13) H. Zaman, A. Yamada, H. Fukuda and Y. Ueda, *J. Electrochem. Soc.* 145 (1998) 565.
- (14) A. F. Mayadas, R. B. L. aibowitz and J. J. Cuomo, *J. Appl. Phys.* 43 (1972) 1287.
- (15) G. Oya, M. Koisha and Y. Sawada, *J. Appl. Phys.* 60 (1986) 1440.
- (16) J. H. Claassen, S. A. Wolf, S. B. Qadri and L. D. Jones, *J. Cryst. Growth* 81 (1987) 557.
- (17) W. H. Henkels and C. J. Kircher, *IEEE Trans. Magn.* 13 (1977) 63.
- (18) E. Zeldov, A. I. Larkin, V. B. Geshkenbein, M. Konczykowski, D. Majer, B. Khaykovich, V. M. Vinokur and H. Shtrikman, *Phys. Rev. Lett.* 73 (1994) 1428.
- (19) T. P. Orlando, E. J. McNiff, Jr., S. Foner and M. R. Beasley, *Phys. Rev. B* 19 (1979) 4545.
- (20) 菊池俊宏, 山下堅也, 菊池真樹, 近澤進, 永田正一, 第33回応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集 (1997) p.27; 菊池俊宏, 平成9年度室蘭工業大学修士学位論文
- (21) J. Q. Xiao, J. S. Jiang and C. L. Chien, *Phys. Rev. B* 46 (1992) 9266.
- (22) S. Zhan and P. M. Levy, *J. Appl. Phys.* 73 (1993) 5315.
- (23) J. H. Kim, J. Q. Xiao, C. L. Chen, Z. Tesaonovic and L. Xing, *Solid State Commun.* 89 (1994) 157.
- (24) R. W. Chantrell, J. Popplewell and S. W. Charles, *IEEE Trans. Magn.* 14 (1978) 975.
- (25) T. Bitoh, K. Ohba, M. Takamatsu, T. Shirane and S. Chikazawa, *J. Magn. Magn. Mater.* 154 (1996) 59.
- (26) E. Ching-Prado, R. S. Katiyar and J. J. Santiago-Aviles, *J. Raman Spectrosc.* 25 (1994) 215.
- (27) D. L. Kaiser, M. D. Vaudin, G. Gillen, C. -S. Hwang, L. H. Robins and L. D. Rotter, *J. Cryst. Growth* 137 (1994) 136.

六方晶Ru-B-M(M=Co, Mn, Cr)の電気伝導度

佐々木 眞^{*1}, 斎藤 一樹^{*2}, 長野 淳^{*3}

Electrical Conductivity of Hexagonal Ru-B-M(M=Co, Mn, Cr)

Makoto SASAKI, Kazuki SAITO and Jun NAGANO

(論文受理日 平成10年8月31日)

Co-, Mn-, Cr-doped ruthenium borides (RuB, RuB_{1.1}) were prepared by the solid reaction. Doped-metal content limited around 1.0 at % from the change as well in the lattice parameters. Their electrical conductivities were measured in the temperature range of 9.5-300 K and resulted metallic character. Considering the residual resistivities, solidified excess boron in the RuB_{1.1} may act as impurities in comparison with RuB. Not only RuB but RuB_{1.1} were evidently identical with the WC-type phase. Solidification sites of the Co, Mn and Cr were discussed by the X-ray diffraction intensity measurement. The electroconductive behavior of the Co-, Mn-, Cr-doped RuB_{1.1} and RuB was an exception to the rule of Linde, and it showed a tendency of relating to the atom space distance along with solidification.

Keywords: Ruthenium boride, Solidification, Residual resistivity, Electrical conductivity

1. 緒論

ボロンは正二十面体や正八面体のクラスターを作る傾向が非常に強い元素であることが知られている⁽¹⁾が、ある特定の遷移金属と化合物を作り、このボロンがクラスターではなく、化合物中で一次元、二次元、あるいは三次元的な原子配列をしているものがあり^(2,3)、MRuB (M; Metal) で表される化合物の中には超伝導体も報告されている^(4,5)。ルテニウムのホウ化

物には、RuB、RuB₂^(6,7)、Ru₁₁B₈、Ru₇B₃、RuB_{1.1}⁽⁸⁻¹⁰⁾ などがあるが、特にRuBとRuB_{1.1}は共にWCまたはAlB₂タイプの結晶構造⁽¹¹⁾で、格子定数は、RuBおよびRuB_{1.1}とも $a=285.2\text{pm}$, $c=285.5\text{pm}$ とまったく同じ値が報告されている^(12,13)など不明な点が多い。また、RuBに関する初期の論文⁽⁸⁾では、 a 軸と c 軸がほとんど同じ長さであることからcubicと報告されているほどである。

そこで本研究では、10K以下で超伝導を示すホウ化ルテニウムのホウ素の原子配列

*1 材料物性工学科

*2 (株) 栗林商会

*3 菱電商事 (株)

が二次元的であることに興味を抱き、このような原子配列を有し、しかもこれまで結晶構造や物性がはっきりしていない RuB および RuB_{1.1} に着目し、Ru と B との固相反応により RuB あるいは RuB_{1.1} 単相の作製条件を調べた後、さらに Co, Mn, Cr, Ag などの金属を固溶したホウ化物を作製し、9.5 K までの電気伝導度を測定することにより、これまでにはっきりしていない RuB_{1.1} の結晶系を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

本研究で選択した添加元素 (Mn, Co, Cr, Ag) は、いずれもをホウ化物を生成し、なおかつそれらが AlB₂、あるいは WC 構造を取り得る元素の中から RuB_{1.1} の a 軸長さ (285.2 pm) に近い構造をとるものを選択した。また Co についてはホウ化物を形成しないが、Mn や Cr などと同じグループの元素であることから比較検討した。

Ru と B、また Mn, Co, Cr, Ag などの粉末を全体の重量が 0.9 g になるよう空气中で秤量し、メノウ乳鉢を用いて乾式混合した。混合した粉末試料をガラス管に入れ、ミキサーを用いてさらに攪拌混合した後、CIP 法 (80 MPa, 1 min) により成型体を作製した。成型試料をアルミナボートにのせ、石英反応管に入れ真空排気した後、アルゴンガス (流量 200 SCCM) を導入し、1173 K、1273 K、1373 K などの温度で熱処理を行った。

熱処理した試料の相同定を X 線回折装置 (理学電機 RV-200) を用いて行った。RuB_{1.1} に Mn, Co を添加したときの格子定数の変化を Cohen の方法を用いて $\cos^2 \theta / \sin \theta$ の外挿関数を使うことにより算出した。

He クローズドタイプ・クライオスタット (岩谷産業、CRT-M310-HA)、微小信号処理ユニットおよびパーソナルコンピュータを用い

て、定電流・直流二端子法で室温から 9.5 K までの直流電気伝導度を測定した。

3. 結果および考察

3.1. ホウ化ルテニウムの合成

RuB、RuB_{1.1} は、これまでの報告によるとどちらも結晶構造は六方最密構造の WC と AlB₂ 構造の混在であるとされている。しかも RuB、RuB_{1.1} のどちらも a、c 軸の長さがほぼ同じであるとされ、興味深い特徴を持っている。WC 構造では、Fig. 1 に示すように Ru が 0、0、0 を、B が 1/3、2/3、1/2 の位置を占める。また AlB₂ 構造では Ru が 0、0、0 を、B が 1/3、2/3、1/2 および 2/3、1/3、1/2 の位置を占めている。

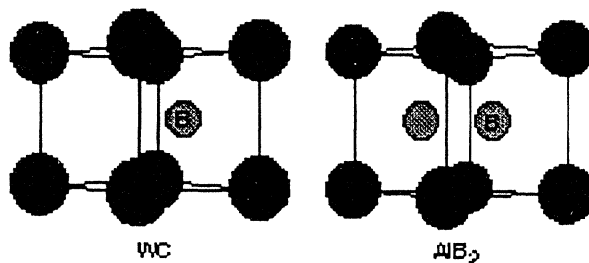


Fig. 1. Supposed structures of RuB for WC, and RuB_{1.1} for AlB₂.

Table 1 にホウ化物で WC あるいは AlB₂ 構造を取り得る化合物の一例を示す。RuB、RuB_{1.1} の典型的な XRD プロファイルを Fig. 2 に、Mn、Co を RuB_{1.1} に添加したときの a 軸、c 軸の格子定数の変化を Fig. 3 にそれぞれ示す。RuB_{1.1} に Mn、Co を添加していくと、a 軸、c 軸共に 1.0 at% 付近まで格子定数が減少していった。これは、B と反応して AlB₂ 構造をとり得る Mn も、またとり得ない Co に関しても同様の挙動を示した。Mn、Co の添加量が 1.0 at% を越え始めると格子定数が増加し始め、それと同時に X 線回折では第二相の回折ピークが現れ始めたので、1.0 at% 付近が固溶限であると考えられる。

Table 1. WC-, AlB₂-type structures of borides.

Crystal system	a-axis (pm)	c-axis (pm)
RuB _{1.1}	285.2	285.5
OsB _{1.2}	287.6	287.1
VB ₂	299.1 299.6	305.0 305.4
CrB ₂	296.9	306.0
AgB ₂	300.0	324.0
MnB ₂	300.9	303.9
AlB ₂	300.9	326.2
TiB ₂	302.8	322.8
MoB ₂	304.0 302.6	306.0 312.0
MgB ₂	308.4	352.2
TaB ₂	309.7 306.5	322.5 328.3
NbB ₂	311.2 309.2	326.4 330.6
UB ₂	313.1 312.9	398.7 398.9
AuB ₂	314.0	352.0
HfB ₂	314.1	347.0
ScB ₂	314.6	351.7
ZrB ₂	316.9	353.0
PuB ₂	318.0	390.0
LnB ₂	324.6	370.4
YB ₂	329.8	384.3

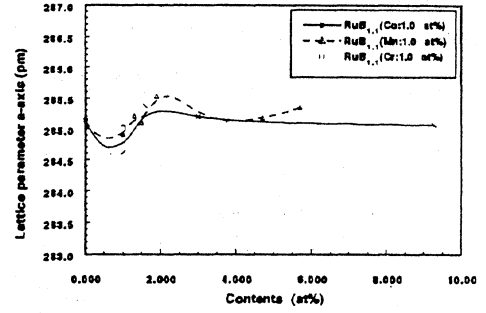


Fig. 3. Lattice parameter change of a-axis RuB_{1.1}.

3.2. RuBおよびRuB_{1.1}の電気伝導度とMn, Co, Cr添加効果

Fig. 4にRuB、RuB_{1.1}の電気伝導度測定結果を示す。RuB、RuB_{1.1}共に、温度の低下と共に比抵抗が低下するという金属的性質を示した。RuB、RuB_{1.1}を比較するとRuB_{1.1}の方が全体的に電気伝導度が高い。これはRuB_{1.1}に過剰に固溶したBが電気伝導機構において不純物的に振る舞い、伝導

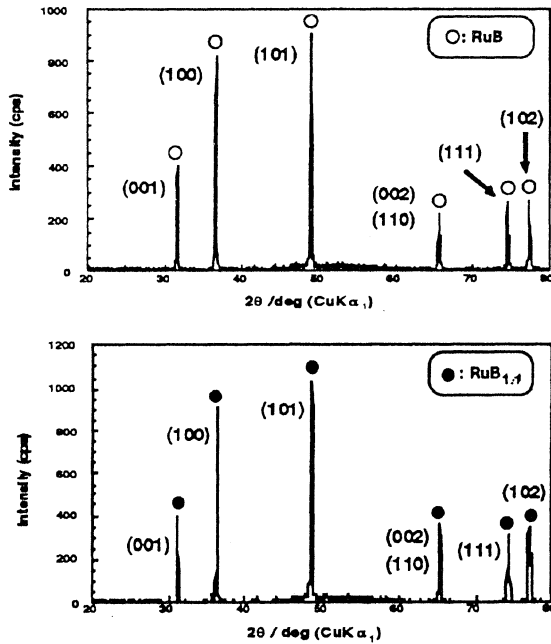


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of RuB and RuB_{1.1}.

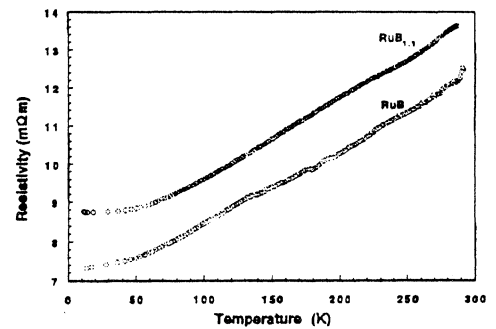


Fig. 4. Resistivity of RuB and RuB_{1.1}.

電子を散乱したためと考えられる。

RuBにMn、Co、Crをそれぞれ1.0 at%添加した試料の電気伝導度をFig.5に示す。RuBにMn、Co、Crをそれぞれ1.0 at%添加した試料は、いずれも金属的性質を示した。さらにそれぞれを比較すると、RuBに金属を添加した試料はいずれも比抵抗、ま

た残留抵抗が低下した。これは一般的に不純物金属がもたらす影響としてはリンデの法則が知られているが、それとは異なる結果となった。

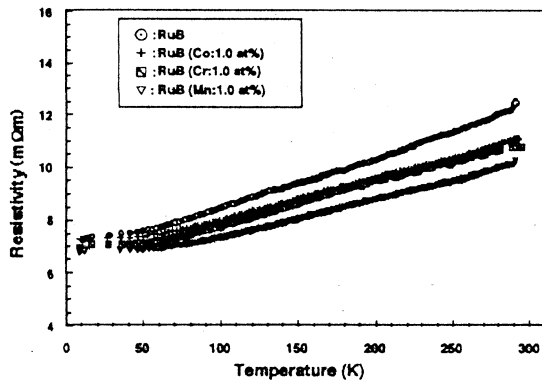


Fig. 5. Resistivity of metal-doped RuB.

Fig.6 に RuB_{1.1} に Mn、Co、Cr をそれぞれ 1.0 at% 添加した試料の電気伝導度の結果を示す。RuB_{1.1} に Mn、Co、Cr をそれぞれ 1.0 at% 添加した試料はいずれも金属的性質を示した。さらにそれぞれを比較すると、RuB_{1.1} に Co、Cr を添加した試料はいずれも比抵抗および残留抵抗共に小さくなった。また Mn を添加した試料については比抵抗が増加した。これは RuB に Mn を添加したときとは逆の結果となった。

一般に金属の伝導度に及ぼす添加元素の影響を考える上で、不純物の電子散乱による抵抗の増加は不純物原子と母金属の価数の差の二乗に比例するというリンデの法則が用いられる。

ここでは RuB、RuB_{1.1} の金属的性質の電気伝導機構は (001) の Ru サイトに大きく関与し

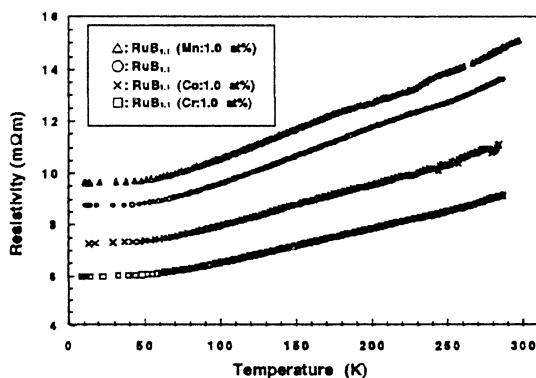


Fig. 6. Resistivity of metal-doped RuB_{1.1}.

ていると考え Ru を母金属、Mn、Co、Cr を Ru と価数の異なる不純物原子と考え、Fig.7 に X 軸に価数の差 (ΔZ) を、Y 軸に残留抵抗の差を取りプロットしたものを示す。RuB に関しては Mn、Co、Cr を添加した試料はいずれも残留抵抗が減少し、Fig. 7 に示すようにリンデの法則には従っていない。RuB_{1.1} に関しては、Mn を添加した試料にのみ残留抵抗の増加が認められたが、Co、Mn よりも価数の差の大きい Cr に関しても RuB 同様残留抵抗が減少した。しかし RuB、RuB_{1.1} への Mn 添加と残留抵抗の増減については十分に説明できない。

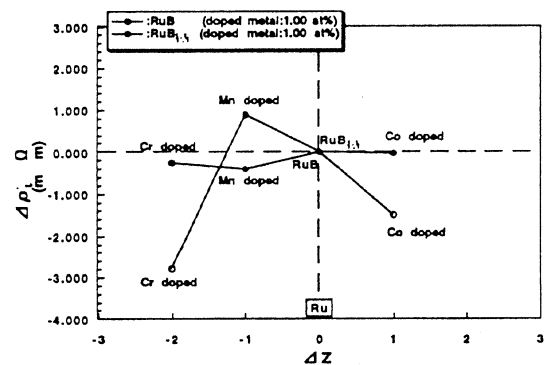


Fig. 7. Linde's expression of residual resistivity of the metal-doped RuB and RuB_{1.1}.

3.3. 格子体積および固溶サイトと残留抵抗の関係

RuB を基準に考えると、Mn、Co、Cr を添加した試料は全て a、c 軸が短くなり、格子体積が小さくなり、残留抵抗も減少した。これは、格子体積の収縮により電子密度が増大したためと考えられる。一方、RuB_{1.1} については Co、Cr を添加したものは体積が収縮し残留抵抗も減少したが、Mn 添加では格子体積が収縮したのにも関わらず残留抵抗が増加した。

次に、RuB、RuB_{1.1} へそれぞれ Mn、Co、Cr をそれぞれ 1.0 at% ずつ添加した試料における固溶サイトについて X 線回折結果の

強度比から考察する。前述したとおり RuB、RuB_{1.1}の結晶構造はWC構造とAlB₂構造との混在であるといわれているが、RuB、RuB_{1.1}の各々の面の原子配列をFig.8に示す。また(100)を基準として、RuBのそれぞれの面の回折強度との比をTable 2に示す。RuBの

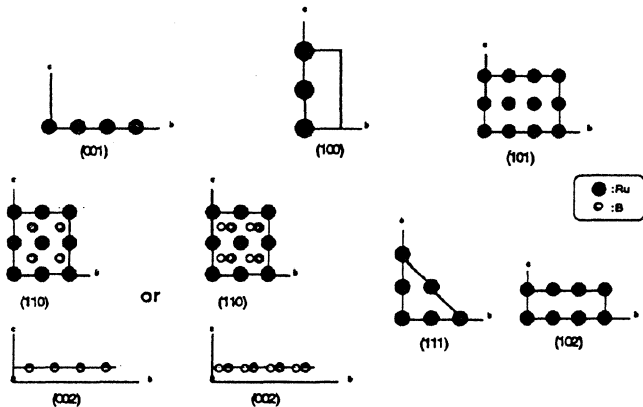


Fig. 8. Lattice planes of RuB and RuB_{1.1}.

(001)に着目すると、Mn、Co、Crを添加した試料はいずれも回折強度が低下した。これはRuより原子量の小さいMn、Co、Crが、(001)のRuサイトに置換固溶したためと考えられる。RuB_{1.1}の(002)(110)に着目すると、RuBに比べて回折強度は増大しているのがわかる。これはRuBより多く含まれたBが、RuB_{1.1}のAlB₂構造のBサイトに置換固溶したことを伺わせる。

他に大きな変化が起こった箇所として、RuBにMnを添加した場合の(002)(110)と(102)の強度が大きく増加したことがあげられる。これはBより原子量の大きいMnが(002)(110)のBサイトに置換固溶したため強度が増加したと考えられる。また(102)のRuサイトにMnが侵入固溶したため強度が増加したと考えられる。(002)(110)のBサイトに置換固溶したMnは、Bの半導体的性質に変わって金属的な性質を示すため比抵抗を低下させたが、一方(102)のRuサイトに侵入固溶したMnは電子散乱を引き起こし比抵抗を増加させたと考えられる。このような2つの効果の強弱により全体的には比抵抗を低下させたのだと考えている。

またMnに関してRuBとRuB_{1.1}とに添加した際に強度や固溶サイトに違いが現れるのは、RuBでは多く余っているAlB₂構造のBサイトにMnが置換固溶するが、RuB_{1.1}ではRuBよりも過剰なBがAlB₂構造のBサイトにMnよりも優先的に固溶したためであると考えられる。

このようなことからRuBとRuB_{1.1}とでMnを添加した際の強度や固溶サイトに違いが現れ、その結果電気伝導度にも違いが現れたと考えられる。

Table 2. X-ray intensity of each planes in Ru-B system.

Crystal	(001)	(100)	(101)	(110) (002)	(111)	(102)
RuB	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
RuB (Mn:1.00 at%)	0.85370	1.00000	1.1185	<u>1.5191</u>	1.2227	<u>1.4940</u>
RuB (Co:1.00 at%)	0.86805	1.00000	0.95807	0.95807	0.76204	1.0455
RuB (Cr:1.00 at%)	0.84657	1.00000	0.99706	0.99706	0.79992	1.0887
RuB _{1.1}	0.94213	1.00000	1.0802	<u>1.4348</u>	1.0349	1.2434
RuB _{1.1} (Mn:1.00 at%)	1.0608	1.00000	1.0768	<u>1.1765</u>	0.86299	0.99104
RuB _{1.1} (Co:1.00 at%)	0.80039	1.00000	0.73128	<u>1.1056</u>	0.76624	1.0346
RuB _{1.1} (Cr:1.00 at%)	1.0827	1.00000	0.97761	<u>1.1666</u>	0.84959	1.0748

4. 結論

Ru、B、また添加元素として Mn、Co、Cr、Ag を使用し、成形体にした後、熱処理による単相の作製を試みた結果、

(1) Ru : 48.0、B : 52.0 at% の組成比で 1273 K、4 時間保持の熱処理を 2 回行うことにより $\text{RuB}_{1.1}$ の単相が得られた。Ru : 50.0、B : 50.0 at% の組成比で 1273 K、4 時間保持、2 度目として 1273 K、8 時間保持の熱処理を行うことにより RuB の単相が得られた。

(2) Ru : 47.0、B : 52.0、M (M = Mn、Co、Cr) : 1.00 at% の組成比で 1273 K、4 時間保持の熱処理を 2 回行うことにより (Ru, M) $\text{B}_{1.1}$ の単相が得られた。Ru $\text{B}_{1.1}$ への Mn、Co、Cr の固溶限は、格子定数の変化からも約 1.00 at% と考えられる。Ru : 49.0、B : 50.0、Mn : 1.00 at% の組成比で 1273 K、4 時間保持、2 度目として 1273 K、8 時間保持の熱処理を行うことにより (Ru, Mn) B の単相が得られた。

RuB、 $\text{RuB}_{1.1}$ 、またそれぞれに添加物として Mn、Co、Cr を 1.0 at% 添加した試料の電気伝導度を測定した結果、

(3) いずれの試料も室温から 9.5 K の間で金属的性質を示した。RuB に比べて $\text{RuB}_{1.1}$ の比抵抗が大きいことから RuB、 $\text{RuB}_{1.1}$ 共に WC 型と考えられ、 $\text{RuB}_{1.1}$ 中に過剰に固溶したホウ素が不純物的に振る舞い、伝導電子を散乱したため伝導度が小さくなったと推察される。

(4) RuB、 $\text{RuB}_{1.1}$ 共に Co、Cr を添加した試料の伝導度はリンデの法則に従わず、固溶に伴う原子間距離と関連している傾向があった。Mn 添加した RuB と $\text{RuB}_{1.1}$ とでは固溶サイトに違いが認められ、それが残留抵抗と関連していると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、室蘭工業大学・特定研究の援助の下に行われたことを付記し、ここに謝意を表すると共に、泉清人前学長のご冥福をお祈りする。

5. 文献

- (1) M. Fujimori and K. Kimura, Properties Associated with a Change of Chemical Bonds in Group III Element Icosahedral Cluster Solids (in Japanese), *Materia Japan*, 37(1998), pp. 606-610.
- (2) J. Aselius, The Crystal Structure of Ru_{11}B_8 , *Acta Chemica Scandinavica*, 14(1960), 2169-2176.
- (3) N. Lundquist, H. P. Myers and R. Westin, The Paramagnetic Properties of the Monoborides of V, Cr, Mn, Fe, Co and Ni, *Phil. Mag.*, 7(1962), pp. 1187-1195.
- (4) D. C. Johnston, Superconductivity in a New Ternary Structure Class of Boride Compounds, *Solid State Commun.*, 24(1977), pp. 699-702.
- (5) CRC Handbook of Chemistry and Physics, edited by D. R. Lide, (CRC Press, New York, 1996), Chap. 12, pp. 59-89.
- (6) J. H. Buddery and A. J. E. Welch, Borides and Silicides of the Platinum Metals, *Nature*, 167(1951), p. 362.
- (7) Binary Alloy Phase Diagrams, editor-in-chief, T. B. Massalski, (American Society for Metals, 1986).
- (8) B. Aronsson, E. Stenberg and J. Aselius, Borides of Ruthenium, Osmium and Iridium, *Nature*, 195(1962), pp. 377-378.
- (9) T. Lundstroem, The Structure of Ru_2B_3 and $\text{WB}_{2.0}$ as determined by Single-Crystal Diffractometry, and Some Notes on the W-B System, *Arkiv Fur Kemi*, 30(1968), pp. 115-127.

(10) M. Khachfi, E. Bauer-Grosse, J. P. Morniroli, T. Lundtroem and M. Gantois, Microstructural Study of the Borides Ru_7B_3 Relationships with M_7C_3 Carbides, *Revue de Chimie Minerale*, 21(1984), pp. 370-382.

(11) Boron, Metallo-Boron Compounds and Boranes, edited by R. M. Adams, (Interscience Publishers,

New York, (1964).

(12) The JCPDS, International Centre for Diffraction Data, (1987), Nos. 30-1101 and 14-75.

(13) Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases, edited by P. Villars and L.D. Calvert, (ASM International, 1991).

Inputs of Atmospheric Heavy Metals to the Kushiro Marsh in East Hokkaido

Hiroshi SHIRAHATA, Song YIN* and Seiji NAKAMURA

(Accepted 31 August 1998)

Concentrations of selected chalcophile metals and Ni were analyzed by IDMS for a dry deposition and fresh waters in the Kushiro marsh, east Hokkaido so as to understand current heavy metal contaminations of ecosystems. Atmospheric inputs of toxic metals, Ag, Cd, Cu, Ni, Pb, Tl and Zn to the marsh area were estimated to be 0.005, 0.07, 2.6, 1.1, 2.2, 0.009 and 8.8 kg/km²/yr, respectively. These elemental precipitations except Cd are distinctly larger than those in Muroran city that is the heartland of the highly industrial area in Hokkaido. The elemental ratios and lead isotopic characteristics studied revealed that the dry deposition in the marsh area is incorporated substantially with eolian lead from distant sources, in part from the highly industrial area in southwest Hokkaido. Furthermore, the surface water of Takkobu lake which is a reservoir of the Kushiro river was contaminated by industrial lead more than the running water of the Kushiro river in the marsh region.

Key words: Kushiro marsh, Dry deposition, Toxic chalcophile elements, Lead isotope ratios

1. INTRODUCTION

There are many marshes in Hokkaido, the northern main island of the Japanese islands and the sum of their areas is 200000 ha which reach to 96 % of the total marsh area in Japan⁽¹⁾. The Kushiro marsh is located in the eastern part of Hokkaido (Fig. 1) and has the widest area among the marshes in Japan. Local and national governments of Japan have tried to preserve wildlife especially unique aquatic vegetation and freshwater fishes, and animals inhabiting in this pristine marsh region specially since it was assigned as the 28th national park of Japan on July 31, 1987. In fact, the marsh is covered by the typical aquatic vegetation such as a *Kita* reed, *Phragmites communis* and a sedge, *Carex*⁽²⁾. Moreover, it offers the inhabitat for the *Ezo*-salamander, *Salamandrella keyserlingi*, the Japanese huchen (or the Sakhalin taimen), *Hucho perryi* and the *Ezokahojiro*-dragonfly, all of which are relic animals survived since the ice age⁽¹⁾. A red-crested white crane, *Grus japonensis*, a specially protected bird designated by the Japanese Government inhabits in the marsh region. The 5th conference for the contracting parties of the Ramsar Convention held in Kushiro city contributed greatly to accelerating the protection of wildlife in the Kushiro marsh as well as other wetlands in Japan⁽³⁾. As a result, the Kushiro marsh has become not only a sanctuary for aquatic birds but also one of the most important bases for migratory birds.

It is essential for the conservation of this animal and plant kingdom to properly understand current environmental conditions about the Kushiro marsh area. Furthermore, this preserved area is suitable for studying bioaccumulation of toxic heavy metals such as

lead and cadmium in ecosystems. In particular, current environmental conditions of the atmosphere and fresh water in the marsh area are necessary to be disclosed because elemental species in the atmospheric and aquatic environment affect essentially to plants and animals living there.

As the first step for understanding bioaccumulation of heavy metals in ecosystems, we focused to reveal the input of chalcophile elements, Ag, Cd, Cu, Pb, Tl and Zn and Ni from the atmosphere into the Kushiro marsh region because they are considered to be potentially toxic species to wild animals as well as human beings. In fact, bioconcentration and/or food chain accumulation of these atmospheric pollutants have been reported on birds, voles, ducks, rats, and grouses from Canada, Japan, USA and other countries⁽⁴⁾. Furthermore, positive relations were observed between air pollutants of chalcophiles and death of birds⁽⁵⁾ and also decline in antler quality of deers⁽⁶⁾. Besides, we have tried to see potential sources of atmospheric lead that is deposited on the marsh area, based on its isotopic characteristics. Although analytical data have been not accumulated enough to clearly understand environmental conditions in the study area today, the present paper reports atmospheric inputs of the selected heavy metals and the existence of eolian lead of distant sources in the Kushiro marsh.

2. SAMPLE AND METHOD

2.1. Sampling location and method

The Kushiro marsh is one of the national parks of Japan, whose lateral dimensions were designated to be 26861 ha, is located ca. 5 Km northwest from Kushiro city in east Hokkaido. The marsh is spread over the drainage area of the Kushiro river, the Akan river, the Settsuri river and the Kuchiyoro river (Fig. 1). There are three lakes in the eastern side of the marsh region; Touro, Shirarutoro and Takkobu, all of which are a reservoir of running water of the Kushiro

Department of Materials Science and Engineering

* Thermo Quest Co.

Hatsudai, Shinjuku, Tokyo Japan

river. River and lake waters were sampled for a study of geochemical characteristics of fresh water running through the marsh area. Running and surface waters were collected at the Iwahogi floodgate of the Kushiro river and at Takkobu lake, respectively. A dry deposition was also received at the Iwahogi floodgate.

A polypropylene container (0.1426 m² in inner dimension) in which 1000 ml of 0.5 % nitric acid solution was pooled was employed to receive dry deposition. The container was placed on a stainless steel structure whose surface was coated with clear acrylic resin so as to minimize metal contamination by the structure itself. The container on the structure was set at a height of 50 cm from the ground and was exposed for 12 hours to receive atmospheric aerosol depositions. The dilute nitric acid solution in the container was then put into an acid-cleaned FEP teflon bottle after exposure to the atmosphere. Low density polyethylene bottles were used to sample fresh waters for the analysis of major ions and heavy metals. The polyethylene bottles for the major ion analysis were previously cleaned with acetone and subsequently were washed with purest water thoroughly. The bottles for heavy metals were rigorously acid-cleaned by the same method as wet depositions⁽⁷⁾. The cleaned polyethylene bottles were triply wrapped with polyethylene bags in order to prevent contamination during transportation to the sampling sites. These plastic vials were handled with polyethylene-gloved hands through sample collection.

2.2. Analytic method

The river and lake waters collected were filtered through a nitrated cellulose membrane filter (0.45 µm in pore size) into an FEP teflon bottle. The membrane filter used was previously washed by soaking a dilute hydrochloric acid solution (1 part of HCl + 2 parts of H₂O) and was rinsed with purest water thoroughly, followed by drying at a room temperature under laminar flow filtered air. The filtrate was prepared to be 0.5 % acid solution by adding an appropriate amount of HNO₃ to shortly store for further chemical treatments. An aliquot was taken from this stock solution and was mixed with a known amount of the multi-spike solution of ⁶²Ni, ⁶⁵Cu, ⁶⁶Zn, ¹⁰⁹Ag, ¹¹⁴Cd, ²⁰³Tl and ²⁰⁶Pb. The dilute nitric acid solution received dry deposition was also filtered by the same method as the water samples and a part of the filtrate was mixed with a known amount of the multi-spike solution. These spiked solutions were allowed to stand for several days in order to ensure the equilibrium between the artificially enriched isotopes added and the corresponding natural ones in the sample solution.

The dithizone-chloroform extraction method was applied to separate the heavy metals of interest from other species in the spiked sample solution. Ag and Cu were extracted from the sample solution under the pH value of 2 and subsequently Cd, Ni, Pb, Tl and Zn were concentrated under the pH value of 9. The metal species separated and concentrated were loaded with a mixture of silica-gel and phosphoric acid onto a Re-filament to analyze on a high resolution surface thermal ionization mass spectrometer (Finnigan MAT 262). Chemical processes for the samples were performed in a ultra-clean laboratory at the Muroran Institute of Technology, where the air is controlled to be Class 10 of the Federal Standard of the United States. Teflon laboratory wares were rigorously pre-cleaned by soaking in warm (ca. 60 °C) acid baths in the following sequence: a dilute nitric acid (3 parts of HNO₃ + 1 part of H₂O) for 3 days, 1 % high purity nitric acid for 1 day and 0.1 % purest nitric acid for 1 day or more, respectively. The acid-soaked wares were thoroughly

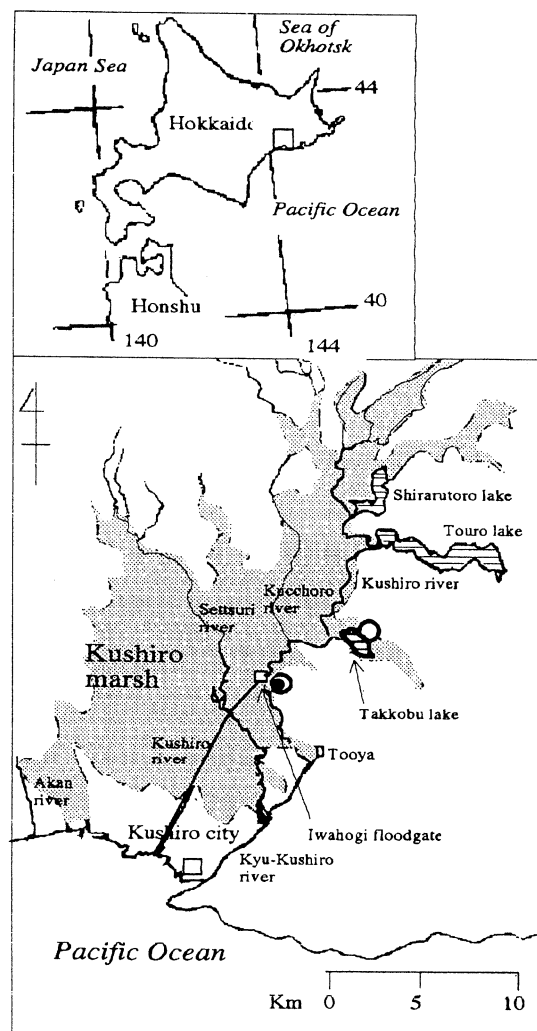


Fig. 1 Distribution of the Kushiro marsh and sampling sites.

Open circle: Sampling location of fresh water.

Solid circle: Sampling location of dry deposition.

rinsed with purest water between baths. Polyethylene and polysulfone wares were cleaned by the similar way as the Teflon wares except heating of the acid baths. The acids and ammoniacal water used were doubly purified by subboiling techniques⁽⁸⁾ from ultra-pure grade reagents commercially available and chloroform was doubly distilled with a borosilicate glass apparatus. Pure dithizone was obtained by recrystallization techniques⁽⁹⁾. Ammonium citrate and potassium cyanide were repeatedly purified by solvent extraction. Laboratory vessels were handled with polyethylene-gloved hands

Table 1. The annual input of atmospheric heavy metals to the Kushiro marsh.

Sample No.	Tl	Ag	Cu	Cd	Ni	Pb	Zn
DDKU9801	0.009	0.005	2.6	0.066	1.1	2.2	8.4
DDMU9701	0.011	0.003	0.46	0.29	0.16	2.3	4.8

Unit: kg/km²/yr

DDKU9801: Dry deposition collected at the Iwahogi floodgate of the Kushiro river.

DDMU9701: Dry deposition collected at Muroran city (Unpublished data).

Table 2. Heavy metal contents in river and lake waters in the Kushiro marsh.

Sample No.	Tl	Ag	Cu	Cd	Ni	Pb	Zn
KU971001-1	0.0128	0.00032	0.335	0.0695	0.143	0.0104	0.296
KU971001-2	0.0048	0.00012	0.291	0.0437	0.147	0.0233	0.321
River water*			1.4				5
River water**			1.5	0.02-0.1	0.3	1	4

Unit: ng/g for KU971001-1 and KU971001-2; ng/ml for river water.

KU971001-1: Water collected at the Takkobu lake.

KU971001-2: Running water collected at the Iwahogi floodgate of the Kushiro river.

* Sugawara K.(1967)⁽¹⁵⁾.

**Kitano Y.(1979)⁽¹⁶⁾.

through the sample preparation and chemical treatments in the ultra-clean laboratory. A lint-free combination suit was put on in the laboratory.

3. RESULTS AND DISCUSSION

On the basis of 30 and 50 measurements of each ratio of the selected isotopes, concentrations of Ag, Cd, Cu, Ni, Pb, Tl and Zn were determined for the samples of a dry deposition, a running water of the Kushiro river and a surface water of Takkobu lake in the Kushiro marsh area. The within-run precision for these elements in the samples was better than 0.3 % in relative standard deviation(2 σ). Table 1 represents the annual precipitation of the seven metals of the dry deposition, which was calculated based on the analytical results and the exposure duration. As seen in Table 1 the Kushiro marsh area received annually the amounts of atmospheric Tl, Ag and Pb comparable with those of Muroran city. In particular, the Cu, Ni and Zn dry depositions on the marsh area were distinctly larger than those on Muroran city.

It is significant that the elemental ratios of Cu to other metals in the dry deposition from the marsh are closer to that of urban atmospheric aerosols in Muroran city rather than Sapporo city and Rishiri island except Ni/Cu(Fig. 2). Because the Kushiro marsh area is located in the eastern district of Hokkaido, the atmosphere above the area probably receives heavy metal aerosols transported by westerly, specially in the spring season. Therefore, it is predictable that heavy metal aerosols emitted from the Muroran-Tomakomai industrial area in southwest Hokkaido are transported in part to east Hokkaido. This assumption seems to be supported by the fact that the dry deposition from the marsh area is plotted between the urban atmospheric aerosol of Kushiro city and one of Muroran city on the diagram of $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Fig. 3). The existence of such an airborne metal as lead occurring in a distant source is not a few case. In fact, it was revealed on the basis of lead isotopic investigations that eolian lead generated in industrial and populated areas in east Asia incorporated with the wet deposition in the Muroran-Tomakomai industrial area in southwest Hokkaido⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

The atmospheric lead aerosol is characterized by its isotopic composition that is essentially subjected to that of anthropogenic lead besides natural sources. Consequently, the isotope ratios of lead in the dry deposition observed in this study are ascribed to result from significant contributions of urban atmospheric lead aerosols emitted from the highly industrial area of southwest Hokkaido and from Kushiro city where is located close to the marsh area. On the other hand, lead aerosols of natural sources can be expected to insignificantly contribute to the isotopic composition of the dry deposition in the Kushiro marsh. This claim is based on the fact that rock and soil from the Hidaka mountain region have distinctly different isotope ratios of lead⁽¹²⁾ from the dry deposition as seen in Fig. 3. The argument mentioned above, however, still remains somewhat obscure since it is not due to lead isotope ratios of the basement rock of the Kushiro marsh and surrounding areas. Actually, geology of this particular areas is quite different from the Hidaka mountain region. The Kushiro marsh area is widely covered by the Alluvium that consists mainly of peat, fine-grained gravel,

clay and gravel beds from surface to depth⁽¹³⁾. Nevertheless, it is estimated that the constituents of the Alluvium there have isotopic ratios of 0.84-0.85 in $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and 2.06-2.10 in $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ratios, respectively, based on data listed by Doe(1970)⁽¹⁴⁾. Furthermore, the $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ratios in the running water of the Kushiro river, which would be substantially

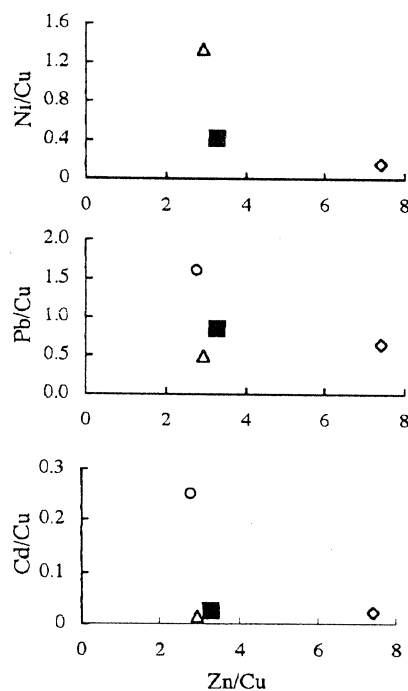


Fig. 2. Relations of elemental ratios between dry depositions and aerosols.

- Solid square: Dry deposition in the Kushiro marsh.
- Open triangle: Aerosol in Muroran, SW Hokkaido (Average of 85 analyses, unpublished data).
- Open diamond: Aerosol in Sapporo, Hokkaido (Data from National Air Monitoring Stations).
- Open circle: Rishiri island, the northernmost Hokkaido(ibid).

contributed by natural lead leached from the basement rock forming the marsh area, are similar to the estimated values (Fig. 3). Thus, it is likely that the isotope ratios of lead in the dry deposition are not affected by natural lead to a large degree.

Very similar contents of the heavy metals analyzed were found between the surface water of Takkobu lake and the running water of the Kushiro river, both of which were sampled in the marsh area (Table 2). Although these concentrations are markedly low in comparison with the mean values for river waters in Japan (Table 2), it does not always denote that the fresh water in the marsh area remains pristine. Evidently Cu and Cd in the fresh water in the marsh area showed respectively 3 and 30 times higher in content than a running water in a pristine region of the Hidaka mountains⁽¹²⁾.

Lead isotope ratios of the fresh waters in the marsh area are considered to principally result from mixing of lead from the atmosphere and lead leached from the basement rock and soil. It is worthy to note that the Kushiro river water showed more radiogenic in lead isotope ratio than the surface water of Takkobu lake, as seen in Fig. 3. Whereas, the surface water lead of the Takkobu lake which is a reservoir of the Kushiro river are shifted to less radiogenic sites on the $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ diagram. In other words, it is plotted at a more closer site to the dry deposition. This can be explained that the lake water contains much larger amounts of atmospheric lead compared to the running water because of a longer residence time in the lake.

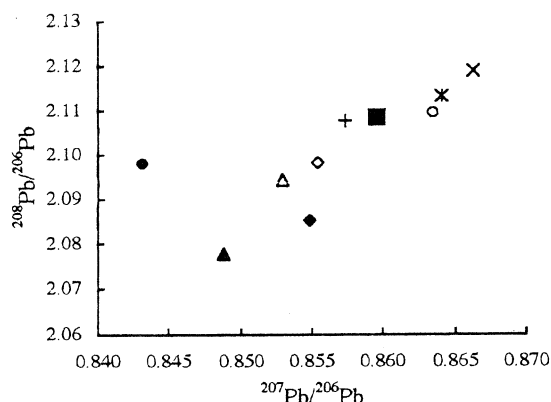


Fig. 3. Pb isotopic characteristics of dry deposition in the Kushiro marsh area.

Solid square: Dry deposition in the Kushiro marsh area.

Solid diamond: Surface water of the Takkobu lake.

Solid triangle: Running water collected at the Iwahogi floodgate of the Kushiro river.

Solid circle: Rock and soil in the Hidaka mountain region, Hokkaido⁽¹²⁾.

Open circle: Aerosol from Muroran, southwest Hokkaido. (unpublished data).

Open diamond: Aerosol from Kushiro, east Hokkaido (unpublished data).

Open triangle: Aerosol from Niseko, southwest Hokkaido (unpublished data).

Cross: Aerosol from Shenyang, northeast China⁽¹⁰⁾.

Asterisk: Aerosol from Beijing, China⁽¹⁰⁾.

Plus: Aerosol from Chengdu, southwest China⁽¹⁰⁾.

CONCLUSION

Because of not only a sanctuary for a many kind of birds but also an inhabitat for particular aquatic vegetation and animals only living there, it has been required to preserve the nature of the Kushiro marsh as pristine as possible. For this purpose a clear understanding of current environmental conditions of this national park and surrounding areas is essential. The present investigation was done to disclose current pollution of toxic metals on the environment of both the atmosphere and the fresh water in the marsh area. As a result, it was found that the Kushiro marsh area received the dry deposition of substantial toxic metal species such as Ag, Tl, Cd, Cu, Pb, Zn and Ni. Annual precipitations of most of them were comparable or much more than those of the highly industrial area in southwest Hokkaido. Moreover, lead isotopic characteristics revealed that airborne lead originated from distant sources contributed largely to the total lead in the dry deposition in the Kushiro marsh area. The lead isotopic data also enabled us to speculate that industrial lead aerosols generated in the highly industrial area in southwest Hokkaido are likely one of the distant sources.

Thus, the present work revealed the fact that current conditions on the atmospheric and aquatic environment of the Kushiro marsh area are significantly contaminated by anthropogenic heavy metals.

ACKNOWLEDGEMENT

We are most indebted to Dr. Kiyoto Izumi, late president of the Muroran Institute of Technology for his encouragement. The present work was supported in part by the grant of the Muroran Institute of Technology.

REFERENCES

- (1) The Association for Geological Collaboration in Japan, Ed. in chief by Minato M., JAPAN and its Nature, Heibunsha, Tokyo, (1977), pp. 220.
- (2) Hokkaido Shinbun-sha, 1992' HOKKAIDO YEARBOOK, Hokkaido news paper publishing company, (1992), pp. 566.
- (3) Environment Agency, Government of Japan, Quality of the Environment in Japan 1994., (1996), pp. 792.
- (4) Newman J. R., Schreiber R. K., and Novakova E., Air pollution effects on terrestrial and aquatic animals, in Air Pollution Effects on Biodiversity, Ed. by Baker J. R. and Tingey D. T., Van Nostrand Reinhold, New York, (1992), p.177-233.
- (5) Nishino O., Arai M., Senda I., and Kuboto K., Influence of environmental pollution on the sparrow (in Japanese), Japan. Jour., Public Health, Vol. 20, (1973), p.1.
- (6) Grodzinska K., Grodzinski W., and Zeveloff S. I., Contamination of roe deer forage in a polluted forest of southern Poland., Environ. Pollut. (Series A), Vol. 30, (1983), p. 367-369.
- (7) Yin S. and Shirahata H., Atmospheric Cd, Cu, Ni and Zn in the highly industrial area of southwest Hokkaido, Japan, Environmental Pollution - ICEP.3, European Center for Pollution Research, (1996), p. 211-228.
- (8) Nakamura S., Chaki K. and Murozumi M., Purification of analytical reagents by sub-boiling distillation and isotope dilution surface ionization mass spectrometry for heavy metals in purified materials (in Japanese), Jour. of the Chem. Soc. of Japan, Chemistry and Industrial Chemistry, No. 5, (1982), p. 735-742.
- (9) Shandell E. B., Colorimetric Determination of Traces of Metals Third Edition, Interscience Publishers, Inc., New York, (1959), pp. 1032.
- (10) Shirahata H. and Yin S., Potential sources of lead in wet precipitation in the highly industrialized area of north Japan. Environmental Pollution - ICEP.3, European Center for Pollution Research, (1996), p. 195-202.
- (11) Shirahata H., Oura S. and Yin S., Chronological variation and origin of atmospheric pollutant species in the Muroran-Tomakomai industrial area in Hokkaido (in Japanese), Proceedings of SHIGEN TO SOZAI '97, (1997), p. 95-98.
- (12) Murozumi M., Nakamura S. and Patterson C., Industrial lead contamination of natural ecosystem in Japan. Geophysical Monograph 95, American geophysical Union, (1996), p. 409-427.

- (13) Editorial Committee of HOKKAIDO, Regional Geology of Japan Part 1 HOKKAIDO, (in Japanese), Ed. in chief by Kato M., Katsui Y., Kitagawa Y. and Matsui M., Kyoritsu Shuppan, Tokyo, (1990), pp. 337.
- (14) Doe B. R., Lead Isotopes, Springer-Verlag, Berlin, (1970), pp.137.
- (15) Sugiura K., Chemistry of the Earth's Crust, Ed. A. P. Vinogradov, (1967), Israel Program for Sci. Translation, p 501.
- (16) Kitano Y., Environmental Chemistry of the Earth(in Japanese), Shokabo, Tokyo, (1979), p. 127.

北海道東部釧路湿原における大気重金属降下量

白幡 浩志、尹 松*、中村 精次

概 要

北海道東部に存在する釧路湿原の大気及び淡水の重金属、特に生物に有害なAg、Cd、Cu、Ni、Pb、Tl、Znによる環境汚染について研究した。これら大気重金属の湿原への年間降下量は、Cd以外は室蘭における降下量と同様、又は多い事が判明した。また湿原を流下する河川及び湖水の重金属濃度は低いが、濃度比や鉛同位体比から大気重金属汚染が認められた。更に鉛同位体比の特徴から、釧路湿原に降下する鉛の一部に、西南海道重工業地帯から移送された人類起源鉛が存在すると推定された。

キーワード： 釧路湿原、乾性降下物、有害親銅元素、鉛同位体比

材料物性工学科、*サーモクエスト（株）

FRPボルト締結体のリラクセーション (構成方程式の応力依存性を考慮した解析)

齊当 建一^{*1}, 西田 公至^{*1}, 石岡 昌瑞^{*2}

Relaxation of Tightening Force in Joint with FRP Bolt and Nut (Analysis in consideration of stress-dependency of constitutive equation)

Ken-ichi SAITO, Kohshi NISHIDA and Masamizu ISHIOKA

(原稿受付日 平成10年5月8日 論文受理日 平成10年8月31日)

Abstract

The relaxation of the fastening force of the joint fastened by the bolt and nut made of Fiber Reinforced Plastics (FRP) is examined analytically by means of the Finite Element Method (FEM) and the results are compared with experimental ones for the purpose of clarifying the optimum conditions of a joint in which the relaxation can be minimized. In this analysis, it is assumed that all elements of the joint is an axisymmetric and that bolt and nut are viscoelastic. The constitutive equation for distortion of the raw material of FRP bolt and nut is expressed by 4-parameter fluid model. Each viscoelastic parameter of the model is determined by the creep tests under various stress levels and is expressed as function of stress, so that the viscoelastic parameters can be used for the nonlinear constitutive equation. The results obtained from these analyses and experiments can be summarized as follows: (1) The compressive spring constant of clamped members should be lowered and the grip length should be lengthened for minimizing the relaxation. (2) Accuracy of the diameter of the bolt hole has little influence on the relaxation.

Key words : Plastics bolt, Tightening force, Relaxation, Viscoelastic model, Nonlinear constitutive equation

1. 緒言

繊維強化プラスチック (FRP) 材料は優れた強度特性と共に耐食性, 電気絶縁性, 耐磁性, 断熱性, 軽量化などの長所を生かし, 様々な分野で使用されている。同様に締結要素においても近年FRP製のねじが試作の段階から商品化へと進むなど, 金属ねじにはない利点への期待も大きい。しかし, プラスチックねじの歴史は浅く, その特性はほとんどが解明されていないのが実情である。

締結用ねじとして必要な特性には, 強度特性や締付けの指針や締付け後の挙動などがある。その中でも強度特性や締付けの指針などは比較的試験も容易なため評価し易いが, ねじの締結性能の重要な条件のひとつである締付け後の締付け力の安定性の評価については困難を伴うことが多い。すなわち, FRP材料の構成素材である母材は常温でもクリープ挙動を示すことが多く, FRP製のねじにおいても締付け後に締付け力が時間の経過と共に低下する現象, すなわちリラクセーションの発生が予想される。

したがって, FRPねじを使用する場合はその締結条件による締付け力のリラクセーションを設計段階で予測し, 評価する方法や, リラクセーションが

* 1 機械システム工学科

* 2 昭和電工(株)

生じにくい締結部とするための設計指針を確立する必要がある。

先に行った非強化プラスチック製ボルト・ナット締結体のリラクセーションに関する研究¹⁾においては、弾性体と粘弾性体の解を関係づける対応原理²⁾を適用して締結力の緩和を予測する方法を提案したが、この方法では高い応力になると、ねじ材料の構成方程式の非線形性や複雑なねじ形状部の応力分布を考慮できないため、予測が困難になるという制約があった。そこで、本研究ではFRP製ボルト・ナット締結体について、材料の構成方程式の応力依存性を考慮した粘弾性モデルを用いて、有限要素法によるリラクセーションの解析法を検討し、これを実験結果と比較している。

2. 粘弾性モデルとその係数の決定

FRPボルト締結体のリラクセーションの解析に有限要素法を適用するにあたって、FRPボルト材料の応力-ひずみ関係（構成方程式）を明らかにする必要がある。そのために、まず最初に各応力レベルにおけるFRP材料のクリープ試験を行ない、粘弾性モデルとその係数を決定する。

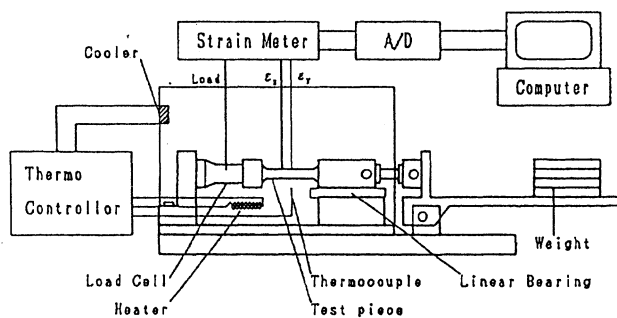


図1 クリープ試験の概要

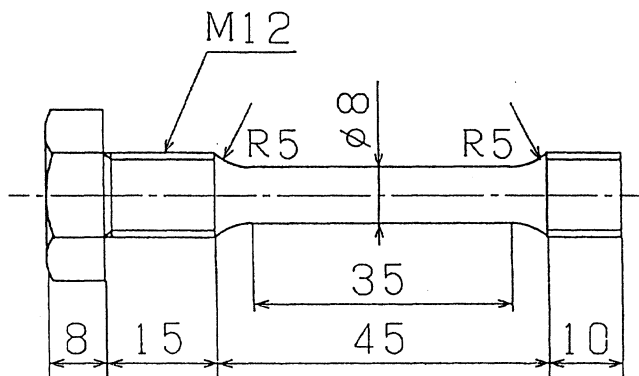


図2 クリープ試験用の試験片

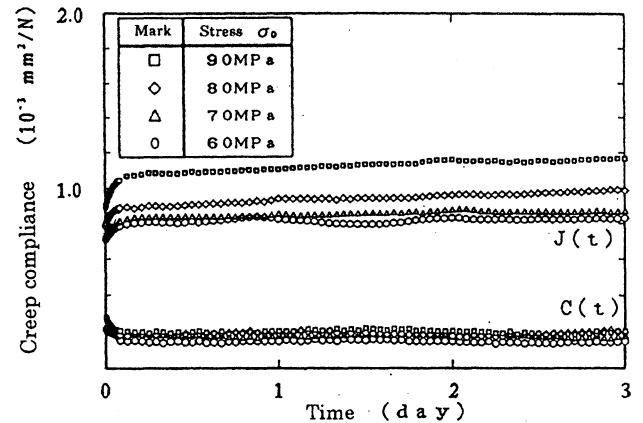


図3 各応力で求めた形状変化と体積変化のクリープコンプライアンス

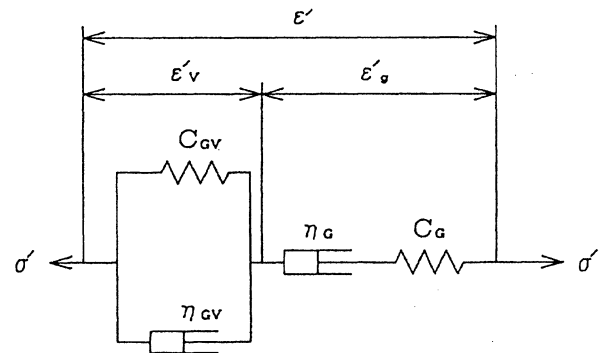


図4 形状変化に適用する4要素流体モデル

2. 1 クリープ試験

本研究で用いたボルト・ナットはグラスファイバーの短繊維で強化されたポリアミド製の射出成形品である。

本研究ではまず解析対象であるFRP製ボルトおよびナットに含まれるガラス繊維の長さは平均で150μm、直径は10μmであり、対象にしているM12ボルトの形状寸法に比べ十分に短いのでFRP製ボルト・ナットを等方性と仮定する。クリープ試験は図1に示すクリープ試験機を用いる。この先端にはおもりを載せ、試験片に対し引張り応力を与える。

図2にFRP材料のクリープ試験に用いた試験片を示す。試験片はFRPボルトM12×70から直径8mmの円筒部を削り出したものを使用し、試験中は試験片の円筒部における軸方向および半径方向の変位を変位計により検出する。また試験片は恒温槽内

において $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に保つ。

クリープ試験の応力レベルとボルト締結体の初期締付け応力を決めるため、まず最初に、試験片の静的引張り試験を行った。その結果、最大応力は約 116MPa を得た。そこで、本研究でのボルト締結体の初期締付け応力 σ_0 を 80MPa とし、クリープ試験ではその前後の応力でFRP材料の構成方程式における応力依存性を検討するため、 60MPa から 90MPa まで 10MPa 刻みでクリープ試験を行なうこととした。

クリープ試験は、ほぼ定常状態となるまで3日間にわたって記録された軸方向変位および半径方向変位から、それぞれ縦ひずみ $\varepsilon_x(t)$ と横ひずみ $\varepsilon_y(t)$ を求め、これらより形状変化と体積変化のクリープコンプライアンス $J(t)$ と $C(t)$ を次式により求める。

$$J(t) = 2 \{ \varepsilon_x(t) - \varepsilon_y(t) \} / \sigma_x \quad (1)$$

$$C(t) = 3 \{ \varepsilon_x(t) + 2 \varepsilon_y(t) \} / \sigma_x \quad (2)$$

図3に $J(t)$ と $C(t)$ の結果を示す。ここで形状変化のクリープコンプライアンス $J(t)$ は、 60MPa から 90MPa までの曲線が変化しており応力依存性を示すが、特に 90MPa になるとその傾向が顕著になる。一方、体積変化のクリープコンプライアンス $C(t)$ は、どの応力値でも瞬間弾性による変化の後にはほぼ横ばいの状態となっており、形状変化に比べて時間依存性および応力依存性のいずれもが小さいことが分かる。

以上のことから、形状変化については図4に示すように粘弾性モデルの中で瞬間弾性、遷移クリープおよび定常クリープを表現できる最小の要素からなる4要素流体モデルを採用する。体積変化については弾性的と近似し、各応力値における瞬間弾性の値 $C(0)$ の平均値を体積変化のコンプライアンス C_k とする。

2. 2 粘弾性モデルの係数の決定

実験から得られた形状変化に関するクリープコンプライアンス $J(t)$ の曲線を用いて図4に示す4要素流体モデルを構成する各要素の係数 C_G , C_{GV} , η_G , η_{GV} を決定する。ここで、4要素流体モデルのクリープコンプライアンス $J(t)$ は次式で表される。

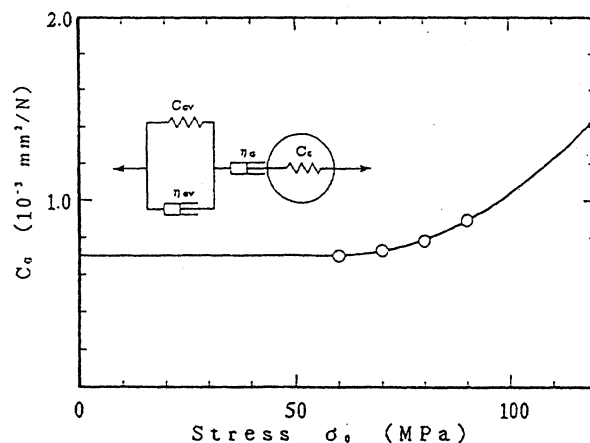


図5 直列ばね要素 C_G の曲線近似

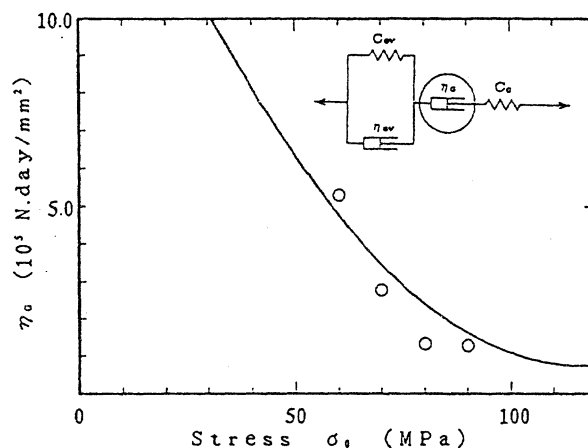


図6 直列ダッシュポット要素 η_G の曲線近似

$$J(t) = C_G + (t / \eta_G) + C_{GV} \{ 1 - \exp(-t / C_{GV} \eta_{GV}) \} \quad (3)$$

図5から図8は、各応力毎に実験から求めた4要素流体モデルの係数 C_G , C_{GV} , η_G , η_{GV} の値とこれを最小二乗法により近似した関数を示す。

図5に示す C_G は、4要素流体モデルにおいて瞬間弾性を表現するばね要素であり、初期の偏差応力に対応する偏差ひずみの量を決定する重要な要素であるから、実験値に対してできるだけ近くなるように2次関数で近似する。図3に示す各応力毎の形状変化のクリープコンプライアンス曲線は応力が高いほど変化が大きく、応力が低いほど一定値に近づく傾向を示す。したがって 60MPa 以下においては60

MPaでの値で一定値とし, 60MPa以上では2次関数で近似する.

図6に示す η_c は4要素流体モデルにおける独立したダッシュポット要素であり, クリープ現象においては η_c は定常クリープの傾斜を決定する要素で長時間の現象を表わす. 実験値を見ると定性的には応力の低い方が硬く, 応力が高いと軟らかいダッシュポットということがいえる. 算出された係数は90MPaまでであるが, 事前に行なったボルトの引張り試験における最大応力116MPaまでその非線形性は続くものと仮定し, 応力の低いところでは2乗に比例してダッシュポットの硬さが増加するものとする. また η_c の値は最大応力において収束すると仮定して2次関数に近似する.

図7と図8に示すVoigtモデル部分の C_{GV} と η_{GV} は, クリープ初期の現象である遷移クリープを特徴づける係数であり, C_{GV} は C_c と同様に応力が

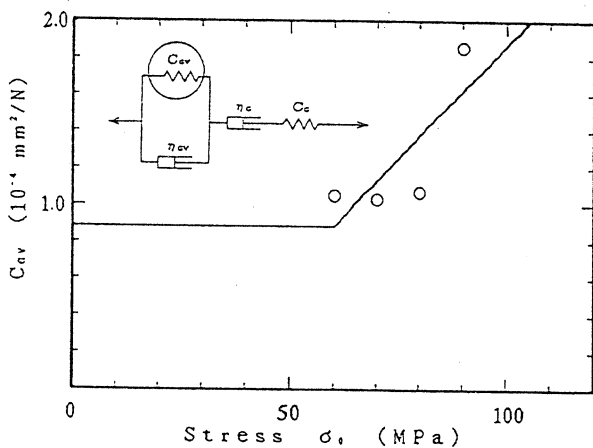


図7 Voigtばね要素 C_{GV} の直線近似

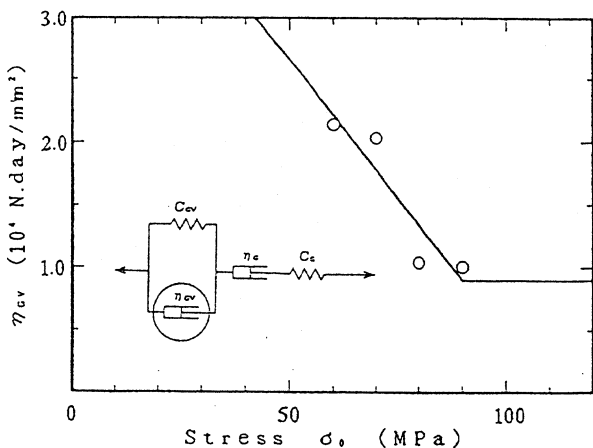


図8 Voigtダッシュポット要素 η_{GV} の直線近似

高くなるにしたがって増加し, η_{GV} は η_c と同様に応力が高くなるにしたがって減少する. しかしいずれも高次の関数に近似するほどの明瞭な傾向は見られないので, 直線で近似する.

3. リラクセーションの解析

FRPボルト締結体の解析モデルは図9に示すように8個のユニットにより構成され, 要素は軸対称三角形一定要素(要素内で応力, ひずみは一定)を用いる. ナットおよびボルトの頭部は実際には六角形であるが, 計算では軸対称問題として扱うため, その六角形の断面積に等しい円に近似した. また, 本研究に用いたFRPボルトは全ねじであるが, 要素数の節減上, ボルト・ナット座面間の遊びねじ部はねじの有効断面積に相当する円柱に近似した.

被締結体を図9に示すように2つのユニットに分け, $t=0$ において, ユニット境界の一方にボルト・

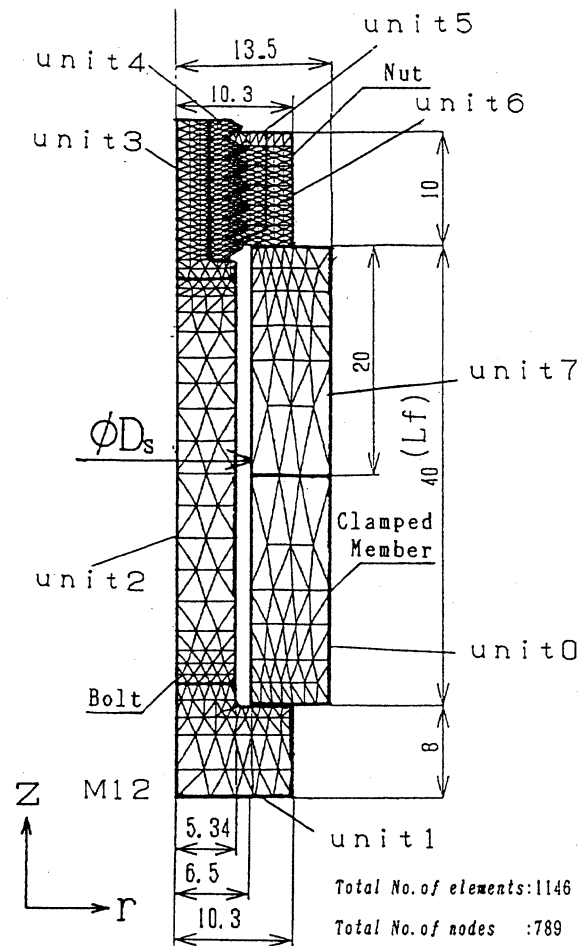


図9 FEM解析の要素分割(基本モデルの場合)

ナットの座面間に引張りが作用する方向の負荷を与え、他方を z 方向のみ拘束することにより、初期締付け力を発生させる。初期締付け後($t > 0$)の粘弾性解析は時間増分 Δt 毎に締付け力の変化量を計算する³⁾。

ここで、解を十分な精度で得るためには Δt を出来る限り小さくとる必要があるが、計算時間も膨大になる。そこで必要な精度を確保するための時間増分を決めるために、厳密解が得られる線形粘弾性の例として円柱モデルのリラクセーションを計算し、有限要素法による数値解との比較をおこなった。

図10にそれぞれの Δt における有限要素法による解と厳密解の比較を示す。 Δt が大きいと厳密解からのずれが大きくなる。そこで、 Δt は表1に示

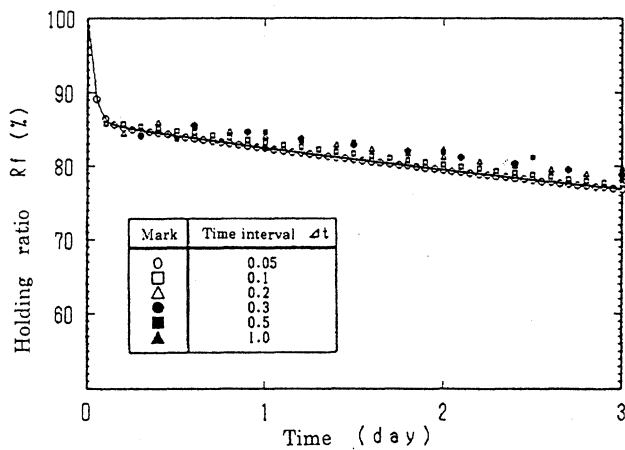


図10 厳密解とFEM解の比較
(均等な Δt の場合)

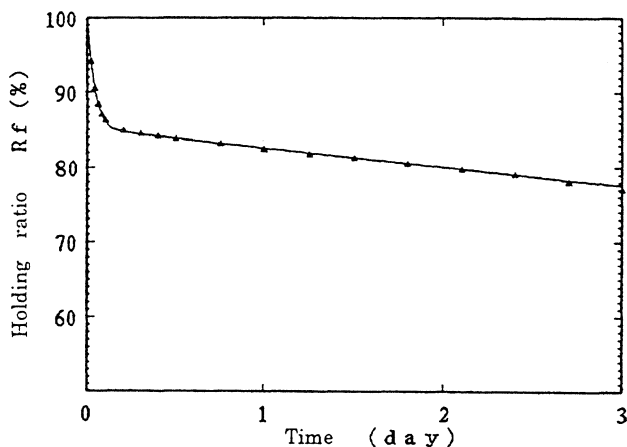


図11 厳密解とFEM解の比較
(表1に示す Δt の場合)

表1 各時刻における時間増分 Δt の配分

Time t day	Time interval Δt day
0~0.1	0.02
0.1~0.5	0.10
0.5~1.5	0.25
1.5~3.0	0.30

すように、応力の急変する初期は小さくとるようにし、その後徐々に増加させていくことにより、図11に示すように厳密解との良い一致が得られている。

4. ボルト締結体のリラクセーション試験による解析結果の評価

以下に示す締結体の条件を基本モデルとし、それに対して、締付け長さ L_f 、被締結体の圧縮ばね定数 K およびボルト穴径 D_s を変えた場合についてリラクセーション試験を行い、解析結果と比較する。

締付け長さ	$L_f = 40\text{mm}$
初期締付け応力	$\sigma_0 = 80\text{MPa}$
被締結体の圧縮ばね定数	$K = 470\text{kN/mm}$
ボルト穴径	$D_s = 13\text{mm}$

ここで、試験片はFRP製のボルトM12×70およびナットを使用し、試験期間は3日間とする。図12にリラクセーション試験の構成を示す。恒温槽はクリープ試験と同様に $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に保ち、締付け力の時間的変化を動ひずみ計およびA/D変換を介し、所定の時間間隔で計測しパーソナルコンピュータへデータを取り込む。

締付け後時間 t だけ経過した締付け力 $F(t)$ の初期締付け力 $F(0)$ に対する割合を百分率で表わし、これを締付け力の保持率 R_f と定義する。

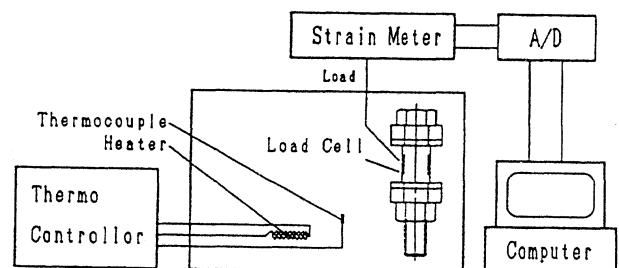


図12 リラクセーション試験の概要

4. 1 リラクゼーションに及ぼす締付け長さの影響

図 1 3 に示すようにリラクゼーション測定用ロードセルおよびスペーサを用いて締付け長さ $L_f=25$ mm, 40mm (基本モデル) および 55mm に設定する。ここで、スペーサの材質は S45C で厚さが 7.5 mm, 15mm の 2 種類で、それらの組み合わせにより締付け長さを変える。

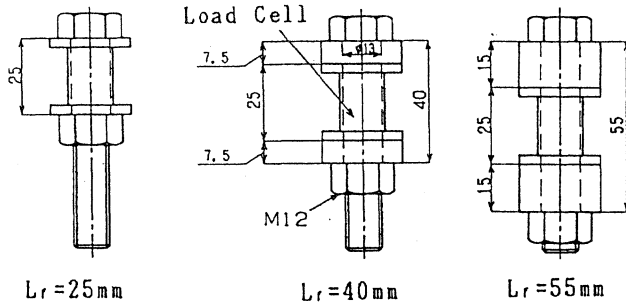


図 1 3 締付け長さの異なる締結体

図 1 4 に締付け長さを変化させたモデルの実験で得られた保持率の時間的変化を解析結果とともに示す。いずれも保持率は、締付け長さが長いほど高くなる傾向を示す。なお解析結果は、 $L_f=55$ mm の場合に実験結果と良く一致するが、これよりも締付け長さが短くなると解析値は実験結果より高い保持率となる。

4. 2 リラクゼーションに及ぼす被締結体の剛性の影響

ここでは、基本モデルおよび基本モデルのうち被締結体の圧縮ばね定数を変えた場合について実験を行ない、保持率を比較する。

図 1 5 に基本モデルのうち被締結体の圧縮ばね定数を低くした 2 種類の締結モデルを示す。同図 (a) はロードセルに板ばね 1 枚とスペーサを組み合わせたものであり、このモデルにおける被締結体のばね定数は $K=14.9$ kN/mm となる。また同図 (b) は板ばね 2 枚のモデルを示す。これは板ばね 2 枚とスペーサを組み合わせたもので、板ばねの一枚はロードセルとし締付け力の検出を行なう。このモデルのばね定数は $K=7.4$ kN/mm である。

図 1 6 にそれぞれのモデルにおける保持率の時間的変化を解析結果とともに示す。どの条件も解析値は実験値より高い保持率を示すが、定性的に良く一致する。文献 4) では、プラスチック製のボルトに

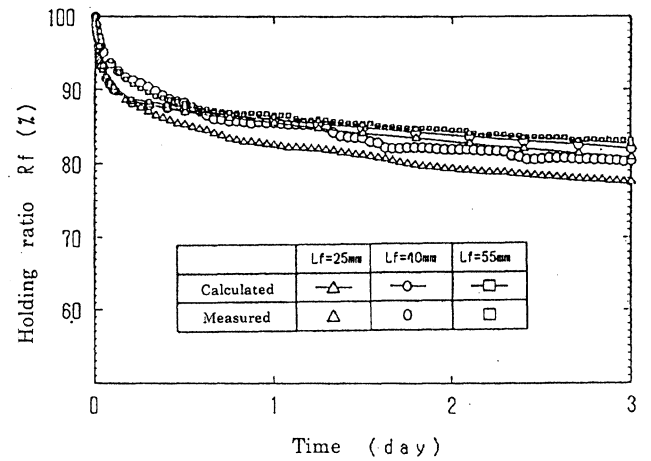


図 1 4 リラクゼーションに及ぼす締付け長さの影響

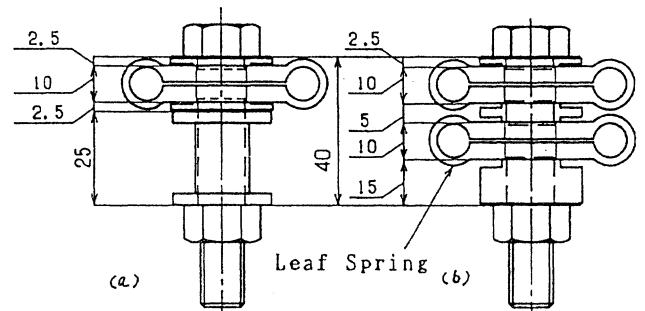


図 1 5 被締結体のばね定数の異なる締結体

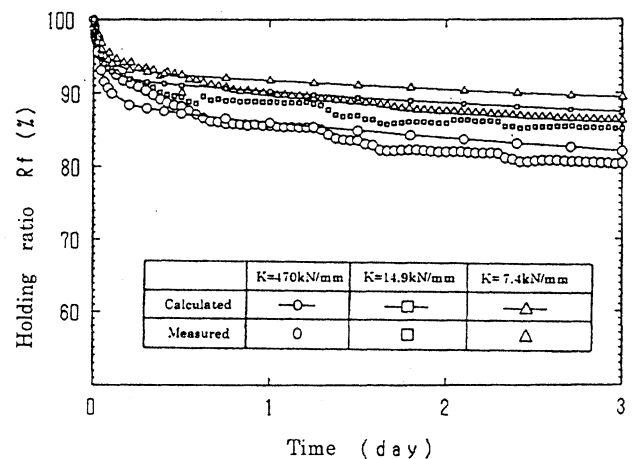


図 1 6 リラクゼーションに及ぼす被締結体のばね定数の影響

よる締結方法の一つとして伸びブッシュの使用を推奨している。この理由を考えると、4.1 節に述べた締付け長さの効果と共に被締結体の圧縮ばね定数 K の低減効果も活用したものと解釈することが出来る。

4. 3 リラクセーションに及ぼすボルト穴径の影響

基本モデル(ボルト穴径 $D_s=13\text{mm}$)に対して $D_s=15\text{mm}$ の場合を比較する。ここで $D_s=13\text{mm}$ は、JIS B 1001(ボルト穴径及びざぐり径)で規定された最小の穴径であり、高精度の組立てに適用される。一方、 $D_s=15\text{mm}$ は精度を要求されない組立てに適用されるもので、許容される上限の穴径として規定されている。

図17に保持率の時間的変化を解析結果とともに示す。これより、解析結果は定量的にも実験結果とほぼ一致すること、さらに保持率はボルト穴径の影響をほとんど受けないことがわかる。

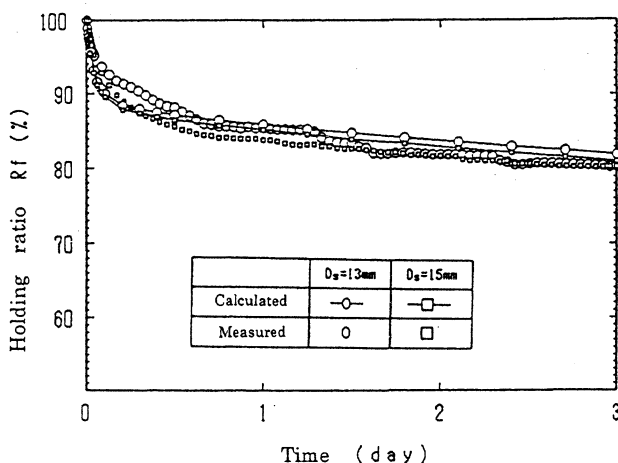


図17 リラクセーションに及ぼすボルト穴径の影響

5. 結言

FRPボルト締結体のリラクセーションを素材のクリープ特性から予測する方法を提案し、締結条件の影響を検討する実験と比較を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) ねじ材料を粘弾性にモデリングしたFEM解析によって緩和の過程をかなり良く予測できる。
- (2) 緩和を少なくするためには、被締結体の圧縮ばね定数を小さく、また締め付け長さを長くすることが有効である。
- (3) ボルト穴の寸法精度は緩和に対してほとんど影響を及ぼさない。

なお、本論文では主に解析法について検討しており、現象それ自体は3日間に限定されている。したがって、より長期にわたるリラクセーションの予測

についてはそれに対応するクリープ特性の把握と粘弾性モデルが必要であり、今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 齊当, 大川: 精密機械, 50, 11(1984)1777.
- 2) W. Flügge: Viscoelasticity, Springer-Verlag, New York, Heidelberg & Berlin(1975)176.
- 3) 鷲津 久一郎, 他: 有限要素法ハンドブック, 培風館(1983).
- 4) R. Krüdener: Neue Möglichkeiten für größere Schrauben und Gewindezugstäbe, PLAST-VERARBEITER, 40, 3(1989)60.

ファジィ推論を用いた牽引自動車の後退運転制御

山下 光久^{*1}, 疋田 弘光^{*1}, 花島 直彦^{*1}

Backer-Upper Control of Articulated Vehicles Using Fuzzy Reasoning

Mitsuhisa YAMASHITA, Hiromitsu HIKITA and Naohiko HANAJIMA

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

This paper describes backer-upper control of lorry type articulated vehicles. It is more difficult to back a lorry type articulated vehicle than a trailer truck, since the joint of the tractor and the trailer is not located on the rear wheel axle of the tractor. We propose a path tracking controller to which we apply control algorithm derived to control a car by using fuzzy reasoning. Simulation and experimental results show that the designed fuzzy controllers effectively achieve the backing control of the articulated vehicle.

key words : fuzzy control, articulated vehicles, path tracking control

1 はじめに

トレーラトラックに代表されるような牽引車両は、トラクタ(牽引車)とトレーラ(被牽引車両)が一点で連結されている形式の車両である。この車両は輸送内容に応じてトレーラを選択でき、一体型のトラックよりも回転半径が小さく、トレーラの切り離しにより荷物の積み替え時間の影響を受けないという利点がある。

しかし牽引車両の後退運転は、その非線形性と不安定性のためにジャックナイフ現象を起こしやすく、1度ジャックナイフを起こすと前進によってしか車両の体制を立て直すことができないため、熟練した運転手でさえ大変な作業となっている。

これまで後退運転の自動制御を目的として、厳密な線形化や非線形制御理論による方法⁽¹⁾⁽²⁾、ファジィ理論やニューラルネットワークを用いた方法⁽³⁾⁽⁴⁾、ニューロファジィ制御による方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾等が提案されているが、我々は一般的な自動車すなわち前部に操舵輪をもつ4輪自動車(以後、自動車と略記)の制御則を利用したトレーラトラックの後退運転制御を提案した⁽⁷⁾。この制御方法は、人間が普通自動車の運転技術をもとにしてトレーラトラックの運転技術を修得していることを考慮したものであり、制御器にファジィ推論を使用している。

本論文では、この制御方法を一般的な牽引車両へ拡張し、シミュレーションおよび模型車両による軌道追従制御を行い制御器の有効性を示す。

* 1 機械システム工学科

2 牽引車両モデル

本論文で制御の対象とする牽引車両を図1に、図中記号の内容を表1に示す。

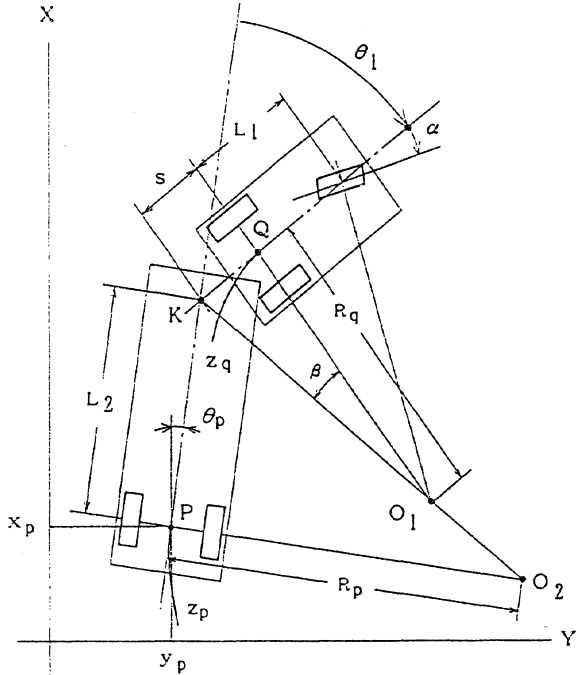


図1: 牽引車両の運動

表1: 使用記号

P	トレーラの代表点
Q	トラクタの代表点
K	トレーラのキングピン位置 (トラクタの第5輪位置)
R_p	トレーラの旋回半径
R_q	トラクタの旋回半径
z_p	点 P の道のり
z_q	点 Q の道のり
O_1	トラクタの回転中心
O_2	トレーラの回転中心
L_1	トラクタのホイールベース
L_2	トレーラの第5輪中心と車軸間距離
θ_1	トレーラの連結角度
θ_p	トレーラの方角角度
s	第5輪オフセット (点 K がトラクタ 後軸の前方にあるとき正符号とする)
α	操舵角

車両の運動において『タイヤに滑りがない』と仮定すると、その挙動は幾何学的観点から以下のように求められる。

$$\frac{d(\theta_1 + \theta_p)}{dz_q} = \frac{1}{R_q} = \frac{\tan \alpha}{L_1} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_p}{dz_p} = \frac{1}{R_p} = \frac{\tan(\theta_1 + \beta)}{L_2} \quad (2)$$

$$\frac{dy_p}{dz_p} = \sin \theta_p \quad (3)$$

$$\frac{dx_p}{dz_p} = \cos \theta_p \quad (4)$$

$$\frac{dz_p}{dz_q} = \frac{\cos(\theta_1 + \beta)}{\cos \beta} \quad (5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{s}{R_q} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{s \tan \alpha}{L_1} \right) \quad (6)$$

3 制御方策と制御器

本論文では牽引車両の代表点をトレーラの代表点 P とし、点 P をあらかじめ設定した軌道に追従させることを制御目的としている。目標軌道と車両の関係は図2に示すように定め、制御器は誤差距離 d と誤差角度および目標軌道の P_r 点での曲率 ($\kappa_r = 1/R_r$) を利用することができるものとする。

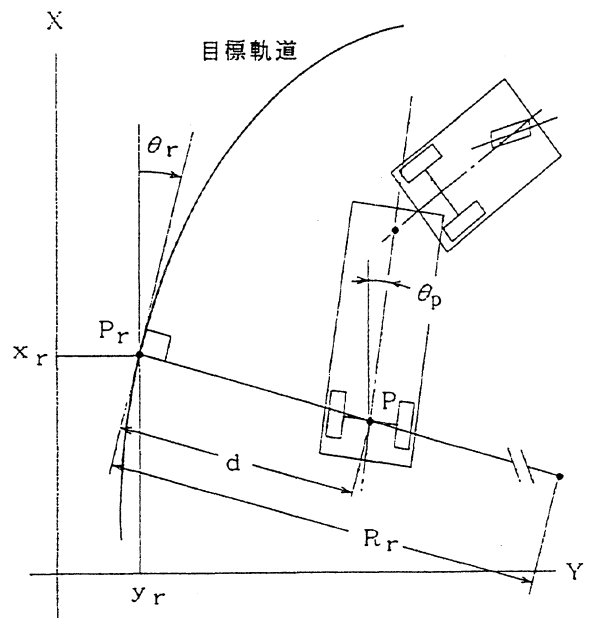


図2: 目標軌道と車両

3.1 制御方策

トレーラのキングピンの位置（点 K ）に仮想的な操舵輪を設けて、トレーラを独立した 1 台の三輪車両とみなす。この車両の点 P を目標軌道に追従させるための制御には、普通の自動車の制御器が利用できる。

トラクタの第 5 輪にオフセットが無い場合は、得られた仮想操舵角にトラクタの連結角が一致するようにトラクタの姿勢を操作することでトレーラトラックの代表点（ P ）を目標軌道に追従させることができる。

しかし、図 3 のように第 5 輪オフセットがある場合、仮想操舵輪は点 Q の位置となる。従って、目標軌道の半径 R_r （あるいは曲率）が与えられた場合、仮想操舵輪の角度（仮想舵角 α_v ）はホイールベースがトレーラのそれと等しい自動車の操舵角 γ に第 5 輪オフセットにより生じた角度 β で補正する必要がある。

この補正角はトレーラトラックの定常円旋回の状態すなわち旋回中心点 O_1 と O_2 が一致する状態から求められる。

トラクタに関しては連結角度 θ_1 が α_v となるようにトラクタの操舵角 α を操作すればよい。ただし、図 4 に示されるように、定常円旋回時のトラクタの旋回半径 R_{r1} はトレーラの旋回半径 R_r と同一ではないので、定常偏差を生じさせないためには、目標軌道の半径に対する R_{r1} を算出してトラクタの操舵角を求めている必要がある。

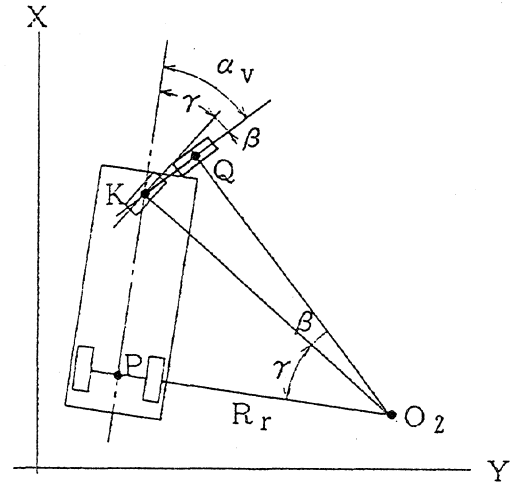


図 3: トレーラの仮想舵角

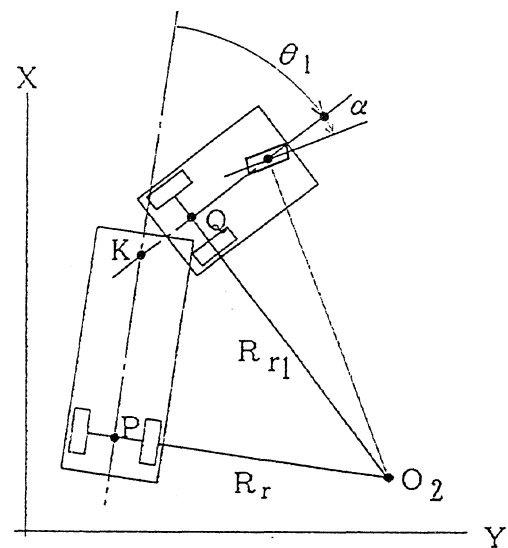


図 4: トラクタの操舵角

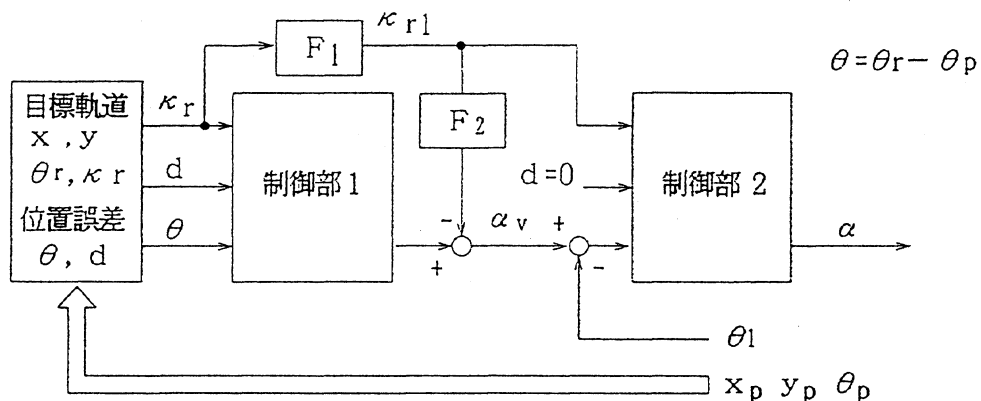


図 5: 制御器の構成

3.2 制御器の構成

3.1の制御方策にもとづいて, 自動車の運転制御器を二つ使用する牽引車両の制御器が図5のように構成される。制御部1および2は, 各々, ホイールベースがトレーラおよびトラクタに等しい自動車に対する軌道追従用制御器である。

F_1 は制御部2を直列結合する際の補正部であり, トラクタに対する目標軌道の曲率を次式で求める。

$$\kappa_{r1} = \frac{1}{R_{r1}} = \frac{\kappa_r}{\sqrt{1 + \kappa_r^2(L_2^2 - s^2)}} \quad (7)$$

F_2 は第5輪オフセット (s) に対する補正角度の計算である。

$$F_2(\kappa_{r1}) = \tan^{-1}(s\kappa_{r1}) \quad (8)$$

3.3 制御器パラメータ

本研究では制御器1,2にファジィ推論を用いた軌道追従用制御器を用いた。この制御器は図6に示すように目標軌道上の点 P_r での接線方向 θ_r とトレーラ中心線方向 θ_p を一致させるための操作量に, 図2で示した距離誤差 d と目標軌道の曲率 κ_r を入力とするファジィ推論から得られた補正角度 $\Delta\alpha$ を加えたものである。

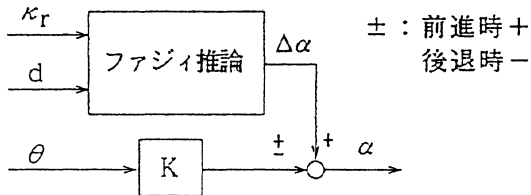


図6: 自動車用軌道追従制御器

$\Delta\alpha$ を求めるためのファジィ規則を図7のように定めた。ファジィ規則の後件部は以下のメンバーシップ関数である,

$$o1 = \frac{1}{2 \tan(\Delta\alpha_{max})} \tan(\Delta\alpha) + 0.5 \quad (9)$$

$$o2 = -\frac{1}{2 \tan(\Delta\alpha_{max})} \tan(\Delta\alpha) + 0.5 \quad (10)$$

制御器1,2のパラメータの適切な値は, 以下のようになる。

制御器1:

$$d_{max} = L_2, \quad \kappa_{rmax} = \frac{\tan(\theta_{1max})}{L_2}$$

制御器2:

$$d_{max} = L_1, \quad \kappa_{rmax} = \frac{\tan(\alpha_{max})}{L_1}$$

ここで α_{max} はトラクタの最大操舵角であり, θ_{1max} はジャックナイフ現象を操舵によって回避できる連結角度の最大値で次式で与えられる。

$$\theta_{1max} = \sin^{-1} \left(\frac{L_2}{L_1} \tan(\alpha_{max}) \cos(\beta_{max}) \right)$$

4 シミュレーションと模型車両による実験

シミュレーションと実験に用いた模型車両の形状を図8に示す。車両は自動車にドーリと呼ばれるタイプのトレーラを連結したものである。このような牽引車両はトレーラトラックと比較するとトラクタとトレーラの軸距比 (L_1/L_2) と第5輪オフセットが大きく, このことが後退運転をより困難にしている。

目標軌道を直線軌道, 円軌道および直線と円弧からなる8の字軌道の3種類とした。各々の目標軌道に対するシミュレーション結果を図9, 図10, 図11に示す。

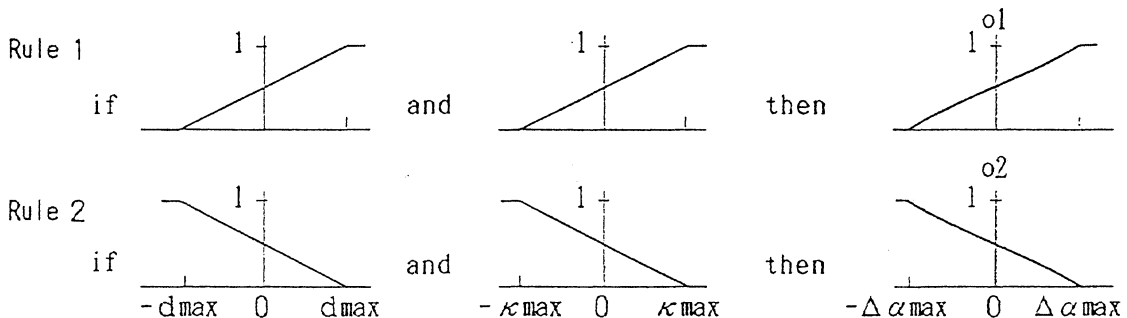


図7: $\Delta\alpha$ に対するファジィ規則

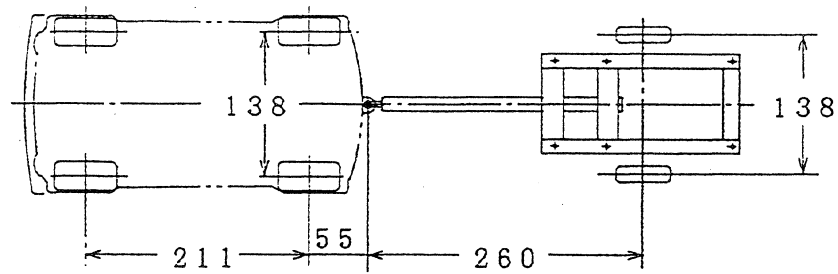


図 8: 模型車両の形状

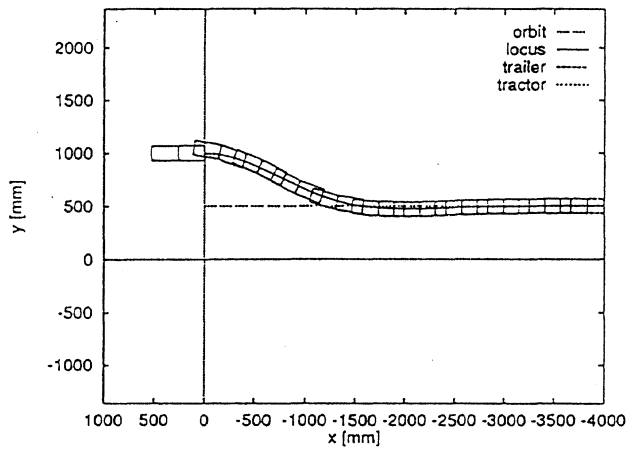


図 9: 直線軌道追従制御

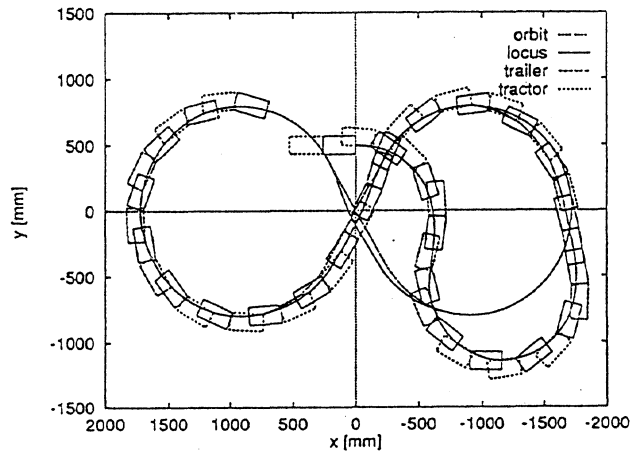


図 11: 8の字軌道追従制御

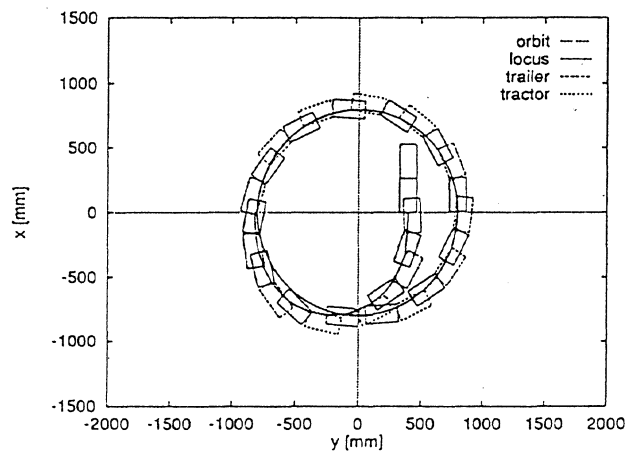


図 10: 円軌道追従制御

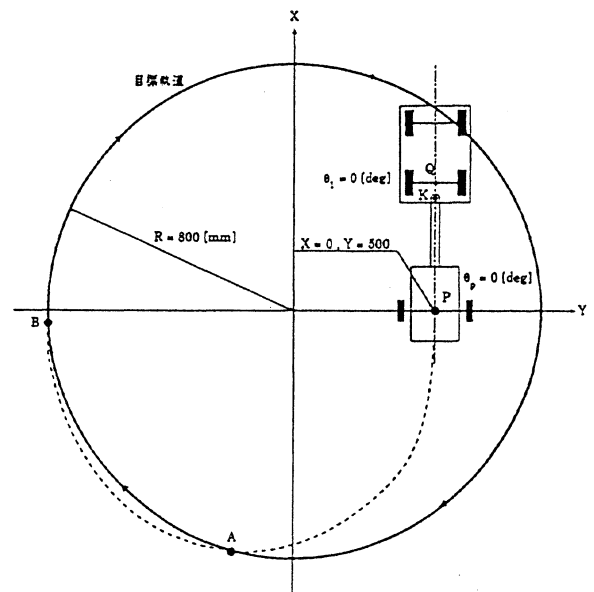


図 12: 円軌道追従制御実験

実験結果の一例として、図 10 のシミュレーションと同一条件下での走行実験結果を図 12 に示す。

5 まとめ

本文ではトレーラトラックの第5輪オフセットを考慮し, 車両モデルを牽引車両の一般型へ拡張した. このような車両の運転制御に, ファジィ推論を含む自動車の軌道追従制御部で構成される制御器を提案し, シミュレーションおよび模型車両による実験で良好な制御結果を確認した. ここで用いた制御部のパラメータ設定は容易であり, トレーラとトラクタの組み合わせの変更に対しても柔軟に対応できる.

また, この制御方法は人間が実際に行う運転方法すなわち自動車の運転からトレーラトラックの運転への拡張に似ており, トレーラトラックの後退運転の際のいくつかの要点が確認されている.

今後は, このような制御方法に学習機能を付加した制御器の構成と学習過程について検討する予定である.

本研究を行なうにあたり多大な協力を頂いた, 平成9年度機械システム工学科卒業研究学生の尾池 卓君に感謝する.

文 献

- (1) 三平満司: 厳密な線形化とそのけん引車両の軌道制御への応用, 計測と制御, Vol.31, No.8, p851-857, 1992
- (2) 三平, 小林: 非線形制御理論を用いた自動車型けん引車両の経路追従制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.4, p427-434, 1994
- (3) Seong-Gon Kong and Bart Kosko: Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck-and-Trailer, IEEE Trans.on Neural Networks, Vol.3, No.2, March, 1992
- (4) D.Nguyen and B.Widrow: The Truck Backer-Upper: An Example of Self-Learning in Neural Networks, Proc.Int.Conf.Neural Networks, Vol.2, p357-363, 1989
- (5) 大家康良: ファジィニューラルネットワークによるトレーラトラックの経路追従に関する研究, 室蘭工業大学修士論文, 1993
- (6) 徳永, 市橋: ニューロファジィ最適制御によるトレーラトラックの後退運転, 8th Fuzzy System Symposium, p49-52, 1992
- (7) 山下, 他: ファジィ推論を用いたトレーラトラックの軌道追従制御, SICE 北海道支部講演会, 1997

The Stability of the Solution of Partial Functional Differential Equation with Delay

Lixin DAI* and Shanjun ZHANG**

(Received 8 May 1998, Accepted 31 August 1998)

The dynamic status of a stable biological system can be described by a set of partial functional differential equations with delay. In this paper, the stabilities of the solutions of these kinds of partial differential equations are discussed by an inequality estimation method. With this method, we obtained a succinct criterion to describe the asymptotic stabilities of the zero solutions.

Keywords: Delay, Partial functional differential equation, Stability.

1 Introduction

In the stable biological systems, the generation numbers of the species are function of time t and age x of the individuals of the species. Because of the life space restraint, food competition, and predating among different species, the distribution density $u(x, t)$ of a certain species varies with delay. The increasing (decreasing) status of the species is described by a set of partial functional differential equations known as "Logistic biological model with delay". In this paper, equation (1) and (31) provided typical examples of the kinds. In the past, the existence and uniqueness of the solutions of these partial functional differential equations are studied by using Liapunov function or Fourier transform [1-4]. Here, we shall discuss another important problem: the stability of the solution of the kinds of functional differential equations. The origin of this paper is an attempt to settle the asymptotic distribution of the solution. We adopted an inequality estimation method, and obtained a succinct measure of the asymptotic stability of the $X^{1,2}(\Omega)$ zero solution, and a judgment of the uniformly convergence to zero on $\bar{\Omega}$ for all solutions.

2 Methods

In the discussion of this paper, we shall use as follows two function spaces $L^p(\Omega)$ and $W^{k,p}(\Omega)$:

Let $L^p(\Omega)$, where $1 \leq p \leq \infty$, denote the whole measurable functions on Ω , which satisfy the following conditions:

$$\begin{aligned} \|u\|_{L^p(\Omega)} &= \|u\|_p = \left\{ \int_{\Omega} |u(x)|^p dx \right\}^{\frac{1}{p}} < \infty & (1 \leq p < \infty) \\ \|u\|_{L^\infty(\Omega)} &= \|u\|_\infty = \operatorname{ess\,sup}_{x \in \Omega} |u(x)| < \infty & (p = \infty) \end{aligned}$$

$L^p(\Omega)$ is a Banach space, specially, if $p = 2$, then $L^2(\Omega)$ is a Hilbert space.

Let $W^{k,p}(\Omega)$, where $1 \leq p \leq \infty$ and integer $k \geq 1$, denote the whole measurable functions which satisfy the following conditions

$$D^\alpha u \in L^p(\Omega),$$

$$\forall |\alpha| \leq k \quad \alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m), \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^m \alpha_i = |\alpha|,$$

$$D^\alpha = \frac{\partial^{|\alpha|}}{\partial x_1^{\alpha_1} \dots \partial x_m^{\alpha_m}}.$$

Its norm is

$$\|u\|_{W^{k,p}} = \left\{ \sum_{|\alpha| \leq k} \int_{\Omega} |D^\alpha u|^p dx \right\}^{\frac{1}{p}}$$

* Department of Mathematics, Jingzhou Teachers' College

** Department of Computer Science and Systems Engineering,
Muran Institute of Technology

or its equivalent form is

$$\|u\|_{w^{k,p}} = \sum_{|\alpha| \leq k} \left\{ \int_{\Omega} |D^{\alpha} u|^p dx \right\}^{\frac{1}{p}}.$$

$w^{k,p}(\Omega)$ is a sobolev space, specially, if $u \in w^{k,p}(\Omega)$, then

$$\|u\|_{w^{k,p}} = \|u\|_p + \|\nabla u\|_p$$

where ∇ is a Hamilton operator.

First let we think the partial functional differential equation with constant delay.

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = D(t)\Delta u(x,t) + A(t)u(x,t) + B(t)u(x,t-\tau), \\ (x,t) \in \Omega \times \mathbf{R}^+ \\ u(x,t) = \varphi(x,t), \\ (x,t) \in \Omega \times [-\tau, 0] \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial \nu} + C(x,t)u(x,t) = 0, \\ (x,t) \in \partial\Omega \times [-\tau, +\infty] \end{cases} \quad (1)$$

where $A(t)$ and $B(t)$ are continuous $n \times n$ matrixes on $[0, +\infty)$, $D(t) = \text{diag}(d_1(t), \dots, d_n(t))$, $C(x,t) = \text{diag}(C_1(x,t), \dots, C_n(x,t))$ and $d_i(t) > 0$, $C_i(x,t) \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, n$. φ is a proper smooth and known n -dimensional function on $\Omega \times [-\tau, 0]$. Δ is a Laplace operator on Ω , i.e., $\Delta = \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$, and $\Omega = \{x = (x_1, \dots, x_m)^T; |x_i| < \delta\}$, is a bounded open subaggregate in \mathbf{R}^m , whose border $\partial\Omega$ is smooth. \mathbf{V} is a uniformizing outer normal vector on $\partial\Omega$, whose delay $\tau \geq 0$, where $\mathbf{R}^+ = [0, +\infty)$.

Definition 1. For $\forall \varepsilon > 0$, $\exists \delta(\varepsilon) > 0$, and $N_1 > 0$, if $\sup_{-\tau \leq t \leq 0} \|\varphi(x,t)\|_{L^2(\Omega)}^2 = M_1 < \delta(\varepsilon)$, We have

$$\|u(x,t,\varphi)\|_{L^2(\Omega)} \leq \varepsilon, \|\nabla u(x,t,\varphi)\|_{L^2(\Omega)} \leq N_1 \varepsilon, (t > 0),$$

then we call the zero solution of (1) is $\mathbf{X}^{1,2}(\Omega)$ stable. If again have

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|u(x,t)\|_{L^2(\Omega)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\nabla u(x,t)\|_{L^2(\Omega)} = 0,$$

then we call the zero solution of (1) is $\mathbf{X}^{1,2}(\Omega)$ asymptotically stable.

Theorem 1. If the equation (1) satisfies $b < r$, then its zero solution is $\mathbf{X}^{1,2}(\Omega)$ asymptotically stable, also, all solutions $u(x,t)$ of (1) satisfy $\lim_{t \rightarrow \infty} u(x,t) = 0$, which uniformly holds for any x , where $x \in \bar{\Omega}$, $b = \sup_{t \geq 0} \|B(t)\|$, $r = \inf_{t \geq 0} \{r(t)\} > 0$, and $-r(t)$ is the maximum eigenvalue of the matrix $A^*(t) = \frac{A^T(t) + A(t)}{2} - l^{-2} \text{diag}(d_1(t), \dots, d_n(t))$, $l = \frac{\delta}{\sqrt{m}}$.

Proof. Multiplying the two sides of (1) by $u^T(x,t)$, notice that for n -dimensional vectors A and B , we have $A^T B =$

$B^T A$, then

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (u^T(x,t)u(x,t)) &= u^T(x,t)D(t)\Delta u(x,t) + u^T(x,t) \\ &\quad A(t)u(x,t) + u^T(x,t)B(t)u(x,t-\tau) \\ &= \sum_{i=1}^n d_i(t)u_i(x,t)\Delta u_i(x,t) + u^T(x,t) \frac{A^T(t) + A(t)}{2} u(x,t) \\ &\quad + u^T(x,t)B(t)u(x,t-\tau). \end{aligned} \quad (2)$$

Integrating the two sides of (2) about x , we get,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} u^T(x,t)u(x,t)dx &= 2 \sum_{i=1}^n d_i(t) \int_{\Omega} u_i(x,t)\Delta u_i(x,t)dx \\ &\quad + 2 \int_{\Omega} u^T(x,t) \frac{A^T(t) + A(t)}{2} u(x,t)dx \\ &\quad + 2 \int_{\Omega} u^T(x,t)B(t)u(x,t-\tau)dx. \end{aligned} \quad (3)$$

Since $C_i(x,t) \geq 0$, by divergence theorem [5] we have

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\nabla u_i \nabla u_i + u_i \Delta u_i)dx &= \int_{\partial\Omega} u_i \frac{\partial u_i}{\partial \nu} dx \\ &= - \int_{\partial\Omega} C_i u_i^2 dx \\ &\leq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Thus

$$\int_{\Omega} u_i \Delta u_i dx \leq - \int_{\Omega} (\nabla u_i(x,t))^2 dx, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

According to Poincaré inequality [6] we have

$$\int_{\Omega} u_i^2(x,t)dx \leq l^2 \int_{\Omega} (\nabla u_i(x,t))^2 dx, \quad (l = \frac{\delta}{\sqrt{m}}). \quad (6)$$

Since $b < r$, then it must exist enough small positive real number ε and σ such that

$$b(1 + e^{2\tau\sigma}) < 2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma). \quad (7)$$

For the ε , then we have

$$\begin{aligned} d_i(t) \int_{\Omega} u_i \Delta u_i dx &\leq -d_i(t) \int_{\Omega} (\nabla u_i(x,t))^2 dx \\ &= -\varepsilon \int_{\Omega} (\nabla u_i(x,t))^2 dx - (d_i(t) - \varepsilon) \int_{\Omega} (\nabla u_i(x,t))^2 dx \\ &\leq -\varepsilon \int_{\Omega} (\nabla u_i(x,t))^2 dx - \frac{d_i(t) - \varepsilon}{l^2} \int_{\Omega} u_i^2(x,t)dx. \end{aligned} \quad (8)$$

Thus (3) can become

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx &\leq -2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, t))^2 dx \\
 &\quad - \frac{2}{l^2} \sum_{i=1}^n (d_i(t) - \varepsilon) \int_{\Omega} u_i^2(x, t) dx \\
 &\quad + 2 \int_{\Omega} u^T(x, t) \frac{A^T(t) + A(t)}{2} u(x, t) dx \\
 &\quad + 2 \int_{\Omega} u^T(t)(x, t) B(t) u(x, t - \tau) dx \\
 &= -2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, t))^2 dx + \frac{2\varepsilon}{l^2} \int_{\Omega} \sum_{i=1}^n u_i^2(x, t) dx \\
 &\quad + 2 \int_{\Omega} u^T(x, t) A^*(t) u(x, t) dx \\
 &\quad + 2 \int_{\Omega} u^T(x, t) B(t) u(x, t - \tau) dx \\
 &\leq -2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, t))^2 dx - 2r \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx \\
 &\quad + 2 \int_{\Omega} \|u(x, t)\| \|B(t)\| \|u(x, t - \tau)\| dx \\
 &\quad + \frac{2\varepsilon}{l^2} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Hence

$$\begin{aligned}
 \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx &\leq \int_{\Omega} \|\varphi(x, 0)\|^2 dx e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2})t} \\
 &\quad - 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2})(t-s)} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx ds \\
 &\quad + 2 \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2})(t-s)} \int_{\Omega} \|u(x, s)\| \|B(s)\| \times \\
 &\quad \|u(x, s - \tau)\| dx ds \\
 &\leq M_1 e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2})t} - 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2})(t-s)} \\
 &\quad \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx ds + \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2})(t-s)} \|B(s)\| \times \\
 &\quad \int_{\Omega} [\|u(x, s)\|^2 + \|u(x, s - \tau)\|^2] dx ds.
 \end{aligned} \tag{10}$$

For $\sigma > 0$ in equation (7), we have

$$\begin{aligned}
 e^{2\sigma t} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx &\leq M_1 e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)t} \\
 &\quad - 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)(t-s)} \int_{\Omega} e^{2\sigma s} (\nabla u_i)^2 dx ds \\
 &\quad + \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)(t-s)} b e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx ds \\
 &\quad + \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)(t-s)} b e^{2\sigma \tau} e^{2\sigma(s-\tau)} \times \\
 &\quad \int_{\Omega} \|u(x, s - \tau)\|^2 dx ds \\
 &\leq M_1 - 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)(t-s)} \{e^{2\sigma s} \times \\
 &\quad \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx\} ds + \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)(t-s)} \times \\
 &\quad b(1 + e^{2\tau\sigma}) \sup_{-\tau \leq \theta \leq s} \{e^{2\sigma\theta} \int_{\Omega} \|u(x, \theta)\|^2 dx\} ds \\
 &\leq M_1 - 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)(t-s)} \{e^{2\sigma s} \times \\
 &\quad \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx\} ds + \frac{1 + e^{2\tau\sigma}}{2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)} b \times \\
 &\quad \sup_{-\tau \leq \theta \leq t} \{e^{2\sigma\theta} \int_{\Omega} \|u(x, \theta)\|^2 dx\}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

The property of the nonreducibility of $p(t)$, where $p(t) = \sup_{-\tau \leq \theta \leq t} \{e^{2\sigma\theta} \int_{\Omega} \|u(x, \theta)\|^2 dx\}$, has been used in the last inequality of (11). So (11) can be deduced into

$$\begin{aligned}
 e^{2\sigma t} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx &\leq M_1 + \frac{b(1 + e^{2\tau\sigma})}{2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)} \times \\
 &\quad \sup_{-\tau \leq \theta \leq t} \{e^{2\sigma\theta} \int_{\Omega} \|u(x, \theta)\|^2 dx\}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Since the right side of (12) does not reduce, then we have

$$\sup_{-0 \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\} \leq M_1 + \frac{b(1 + e^{2\tau\sigma})}{2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)} p(t) \tag{13}$$

and

$$\begin{aligned}
 &\sup_{-\tau \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\} \\
 &\leq \sup_{-\tau \leq \theta \leq 0} \{e^{2\sigma \theta} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\} \\
 &\quad + \sup_{0 \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\} \\
 &\leq M_1 + \sup_{0 \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Thus

$$p(t) \leq 2M_1 + \frac{b(1 + e^{2\tau\sigma})}{2(r - \frac{\varepsilon}{l^2} - \sigma)} \sup_{-\tau \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\}. \tag{15}$$

From (7) we know

$$1 - \frac{b(1 + e^{2\sigma\tau})}{2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)} = h > 0$$

Then

$$p(t) = \sup_{-\tau \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\} \leq \frac{2}{h} M_1 \quad (16)$$

Substituting (16) into (11), if $t > a > 0$, then

$$\begin{aligned} e^{2\sigma t} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx &\leq M_1 [1 + \frac{2}{h}(1 - h)] \\ &- 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)(t-s)} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx\} ds \\ &= M_1 [1 + \frac{2}{h}(1 - h)] - 2\varepsilon (\int_0^{t-a} + \int_{t-a}^t) e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)(t-s)} \times \\ &\quad \sum_{i=1}^n \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx\} ds \\ &\leq M_1 [1 + \frac{2}{h}(1 - h)] - 2\varepsilon \int_{t-a}^t e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)(t-s)} \times \\ &\quad \sum_{i=1}^n \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx\} ds. \end{aligned} \quad (17)$$

Note that

$$\begin{aligned} &- 2\varepsilon \int_{t-a}^t e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)(t-s)} \sum_{i=1}^n \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx\} ds \\ &= -2\varepsilon a e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)(t-\eta)} \sum_{i=1}^n \{e^{2\sigma \eta} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, \eta))^2 dx\} \\ &\leq -2\varepsilon a e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)a} \sum_{i=1}^n \{e^{2\sigma \eta} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, \eta))^2 dx\} \\ &\quad \eta \in [t-a, t]. \end{aligned} \quad (18)$$

Thus

$$\begin{aligned} e^{2\sigma t} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx &+ 2\varepsilon a e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)a} \times \\ &\sum_{i=1}^n \{e^{2\sigma \eta} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, \eta))^2 dx\} \leq M_1 [1 + \frac{2}{h}(1 - h)]. \end{aligned} \quad (19)$$

Since the right side of (19) is independent of t , for $t > a$, we have

$$\begin{aligned} &\sup_{t-a \leq s \leq t} \{e^{\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\} \\ &+ 2\varepsilon a e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)a} \sum_{i=1}^n \sup_{t-a \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx\} \\ &\leq M_1 [1 + \frac{2}{h}(1 - h)]. \end{aligned} \quad (20)$$

Such that

$$\begin{aligned} &\int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx + 2\varepsilon a e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)a} \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, t))^2 dx \\ &= \{e^{2\sigma t} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx + 2\varepsilon a e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)a} \times \\ &\quad \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} e^{2\sigma t} (\nabla u_i(x, t))^2 dx\} e^{-2\sigma t} \\ &\leq [\sup_{t-a \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\} + 2\varepsilon a e^{-2(r - \frac{\tau}{i^2} - \sigma)a} \times \\ &\quad \sum_{i=1}^n \sup_{t-a \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx\}] e^{-2\sigma t} \\ &\leq M_1 [1 + \frac{2}{h}(1 - h)] e^{-2\sigma t} \end{aligned} \quad (21)$$

From formula (21), it is easy to conclude that the zero solution of (1) is $\mathbf{X}^{1,2}(\Omega)$ asymptotic stable.

In the following, we shall prove that $\lim_{t \rightarrow \infty} u(x, t) = 0$ holds uniformly for $x \in \bar{\Omega}$.

From (21) we know,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|u_i(x, t)\|_{L^2} = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\nabla u_i(x, t)\|_{L^2} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

At the mean time, there must exists a positive constant M that,

$$|u_i(x, t)| \leq M, \text{ and } |\nabla u_i(x, t)| \leq M \quad (23)$$

holds for any (x, t) , where $(x, t) \in \bar{\Omega} \times R^+$.

From (23) we know, $\|u_i(x, t)\|_{\infty}$ and $\|\nabla u_i(x, t)\|_{\infty}$ are bounded functions. Cite the inequality in reference [5]

$$\|Z\|_p \leq \|Z\|_{\infty}^{(p-2)/p} \|Z\|_2^{2/p},$$

then if $p \geq 2$, we have

$$\|u_i(x, t)\|_p \leq \|u_i(x, t)\|_{\infty}^{(p-2)/p} \|u_i(x, t)\|_2^{2/p}, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (24)$$

and

$$\|\nabla u_i(x, t)\|_p \leq \|\nabla u_i(x, t)\|_{\infty}^{(p-2)/p} \|\nabla u_i(x, t)\|_2^{2/p}, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (25)$$

Again from (22) we get

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|u_i(x, t)\|_p = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\nabla u_i(x, t)\|_p = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (26)$$

According to Sobolev inequality [7], if $m < p$, we have

$$\|V\|_{\infty} \leq C\{\|V\|_p + \|\nabla V\|_p\} \equiv C\|V\|_{W^{1,p}}. \quad (27)$$

Where $C = C(\Omega, m, p)$ is a positive constant.

Hence,

$$\|u_i(x, t)\|_{\infty} \leq C\{\|u_i(x, t)\|_p + \|\nabla u_i(x, t)\|_p\}. \quad (28)$$

From (26) we have

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|u_i(x, t)\|_\infty = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (29)$$

From (29) we know the next equation will uniformly hold for $x \in \bar{\Omega}$.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_i(x, t) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (30)$$

Next, we consider the equation with boundless delay

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = D(t)\Delta u(x, t) + A(t)u(x, t) \\ \quad + \int_{-\infty}^t B(t, s)u(x, s)ds, \\ (x, t) \in \Omega \times \mathbf{R}^+ \\ u(x, t) = \varphi(x, t), \\ (x, t) \in \Omega \times \mathbf{R}^- \\ \frac{\partial u(x, t)}{\partial \nu} + C(x, t)u(x, t) = 0, \\ (x, t) \in \partial\Omega \times \mathbf{R} \end{cases} \quad (31)$$

, where $B(t, s)$ is a continuous $n \times n$ matrix function for t and $s, -\infty < s \leq t < +\infty$, $\mathbf{R}^- = (-\infty, 0]$, $\mathbf{R} = (-\infty, +\infty)$. The others are the same with those in (1).

□

Theorem 2. When $\|B(t, s)\| \leq be^{-h(t-s)}$, $b < rh$, the zero solution of equation (31) is $X^{1,2}(\Omega)$ asymptotic stable, therefore, all the solutions $u(x, t)$ uniformly holds for any $x \in \bar{\Omega}$ that $\lim_{t \rightarrow \infty} u(x, t) = 0$, where r is the same with that of Theorem 1.

Proof. Since $b < rh$, it must exist enough small positive real number ε and σ , that

$$\frac{b}{2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)} \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{h - 2\sigma} \right) < 1$$

similar to Theorem 1 we can get

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx &\leq M_2 e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2})t} - \\ &2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2})(t-s)} \int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx ds \\ &+ 2 \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2})(t-s)} \int_{\Omega} \|u(x, s)\| \times \\ &\int_{-\infty}^s be^{-h(s-\theta)} \|u(x, \theta)\| d\theta dx ds \\ &\leq M_2 e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2})t} - 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2})(t-s)} \times \\ &\int_{\Omega} (\nabla u_i(x, s))^2 dx ds + \frac{b}{h} \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2})(t-s)} \times \\ &\int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx ds + \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2})(t-s)} \times \\ &\int_{\Omega} \int_0^\infty be^{-h\theta} \|u(x, s - \theta)\|^2 d\theta dx ds, \end{aligned} \quad (32)$$

where $M_2 = \sup_{-\infty \leq s \leq t} \int_{\Omega} \|\varphi(x, s)\|^2 dx$. For $\sigma > 0$, we have

$$\begin{aligned} e^{2\sigma t} \int_{\Omega} \|u(x, t)\|^2 dx &\leq M_2 e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)t} \\ &- 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)(t-s)} \int_{\Omega} e^{2\sigma s} (\nabla u_i(x, s))^2 dx ds \\ &+ \frac{b}{h} \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)(t-s)} \int_{\Omega} e^{2\sigma s} \|u(x, s)\|^2 dx ds \\ &+ b \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)(t-s)} \int_{\Omega} \int_0^\infty e^{-(h-2\sigma)\theta} \times \\ &e^{2\sigma(s-\theta)} \|u(x, s - \theta)\|^2 d\theta dx ds \\ &\leq M_2 - 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)(t-s)} \int_{\Omega} e^{2\sigma s} (\nabla u_i(x, s))^2 dx ds \\ &+ \frac{b}{h} \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)(t-s)} \int_{\Omega} \sup_{-\infty \leq \theta \leq s} \{e^{2\sigma\theta} \|u(x, \theta)\|^2\} d\theta dx ds \\ &+ b \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)(t-s)} \int_{\Omega} \int_0^\infty e^{-(h-2\sigma)\theta} \times \\ &\sup_{-\infty \leq \theta \leq s} \{e^{2\sigma\theta} \|u(x, \theta)\|^2\} d\theta dx ds \\ &\leq M_2 - 2\varepsilon \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{-2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)(t-s)} \times \\ &\int_{\Omega} e^{2\sigma s} (\nabla u_i(x, s))^2 dx ds \\ &+ \frac{b}{2(r - \frac{\varepsilon}{r^2} - \sigma)} \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{h - 2\sigma} \right) \times \\ &\sup_{-\infty \leq s \leq t} \{e^{2\sigma s} \int_{\Omega} \|u(x, s)\|^2 dx\}. \end{aligned} \quad (33)$$

Similar to the inferences of (11) - (30), we can get the conclusion of theorem 2. □

3 Conclusion

In this paper, we studied the stability of the solution of the Logistic biological model with delay. We proposed two theorems to provide a succinct criterion of asymptotic stability of the zero solution through inequality value evaluating method.

References

- [1] Arditc, A. & Riceidri, P. Nonlmeear Anal. 1980, 2: 411 - 421.
- [2] Mengxing he, Abstract Functional Differential Equations VII Bounded, Periodic and Almost Periodic Solutions, stable and unstable Manifolds, ACTA mathematica Sinica, Peking, 1990, 33(2): 205-231.
- [3] Siaoling Xiang, Existence of Periodic Solutions for Delay Partial Differential Equation, ACTA Mathematica Application Sinica Peking, 1991, 14(1):73-81.

- [4] Shengli Sie, Stability of Solution for Parabolic Partial Functional Differential Equation with Delay. Notification for General Information of science, Peking, 1991, 36(18): 1435-1436.
- [5] Gilabarg, D. & Trudinger, N.S. Elliptic Partial Differential Equations of Second order, Springer-Verlag, Heidelberg, New York, 1977.
- [6] Bers, L. Joho, F. and Schechter, M. Partial Differential Equations, Amer. Math. Soc. Providence, Rhode Island, 1964.
- [7] Adams, R. A. Soblev Spaces. new York: Academic Press. 1975.

遅延を持つ汎関数の偏微分方程式の解の安定性について

代 立新*・張 善俊**

概 要

生態系のダイナミックな状態は、しばしば遅延を持つ汎関数の偏微分方程式で説明される。本論文では、このような汎関数の偏微分方程式の解の安定性を不等式で推定し、ゼロ解の漸近収束の簡潔な判定基準を提示した。

キーワード：遅延、汎関数偏微分方程式、解の安定性

* 荊州師範学院 数学系、 ** 情報工学科 (知識工学講座)

超小型地球局を利用した衛星通信実験システムの構築

畑中 雅彦^{*1}, 鈴木 真也^{*1}, 岡 和喜男^{*1}, 杉岡 一郎^{*1}

A System Design of Satellite Telecommunication Experiments Based on Very Small Aperture Terminal

Masahiko HATANAKA, Shinya SUZUKI, Wakio OKA and Ichiro SUGIOKA

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

We have been constructing a satellite telecommunication experiment system using by one channel of 64 Kbps satellite communication link and a very small aperture terminal (VSAT). This experiment system is divided into three sub-systems: i). VSAT remote monitor and control sub-system, ii). automatic rainfall attenuation measurement sub-system, and iii). telecommunication and network routing sub-system. Large part of the remote access and control software for these sub-systems was designed and coded by ourselves. In this paper, we report an all-inclusive result of our constructed experimental system and related studies.

Key words : VSAT, Telecommunication Satellite, Rainfall Attenuation Measurement, Network

1. はじめに

衛星通信は、広域性・同報性・回線設定の柔軟性・対災害性などの特徴を有し、日本においても既に種々の利用形態で実用化されている^[1]。また、インターネット(The Internet)の通信インフラの一つとして、衛星通信回線を利用する試みも始まっている^[2, 3]。衛星通信の耐災害性を利用したユニークな試みとして、WIDEプロジェクトを主体とする研究グループにより、災害によって損壊した地上通信設備に変えて衛星回線を用いてネットワークを迅速に再構成するための実験「インターネット防災訓練」が行われている^[4]。

これら衛星通信の普及において、極めて小型で安価な超小型地球局(Very Small Aperture Terminal; VSAT)^[5, 6]の実用化が大きな役割を果たしてきている。

我々は、学内に超小型地球局(VSAT)を設置して、1993年1月に郵政省より実験用無線局開設の免許を取得した(局名: Unsat協議会 JCS 北海道可搬 3)。また、「デジタル衛星通信の大学間高度共同利用研究(UnSAT)協議会」に参画し、(株)日本サテライトシステムズから提供されている64 Kbpsの衛星通信回線を用いて共同研究を行ってきている^[7, 8]。

今回、この衛星回線と本学に設置された超小型地球局を利用した衛星通信実験用のシステムの基本部分の構築をほぼ終えたので(図1のシステム概観図を参照)、構築した実験システムに関する総合報告を行う。

*1 情報工学科

2. 衛星通信システム概要

2.1 通信衛星について

通信衛星として, 1997年3月までは東経 150° の静止軌道上にあった JCSAT-1 号衛星を, 1997年10月以降は同じ軌道位置に置き変わった JCSAT-1A 号衛星を利用している (図2). 両通信衛星は Ku バンド^{*1} の中継器を有しており, 衛星への送信 (Up Link) 周波数は 14 GHz 帯, 衛星からの受信 (Down Link) 周波数は 12 GHz 帯である. 本学から見た衛星の方位角および仰角はそれぞれ 166.78° と 40.31° である (図3参照).

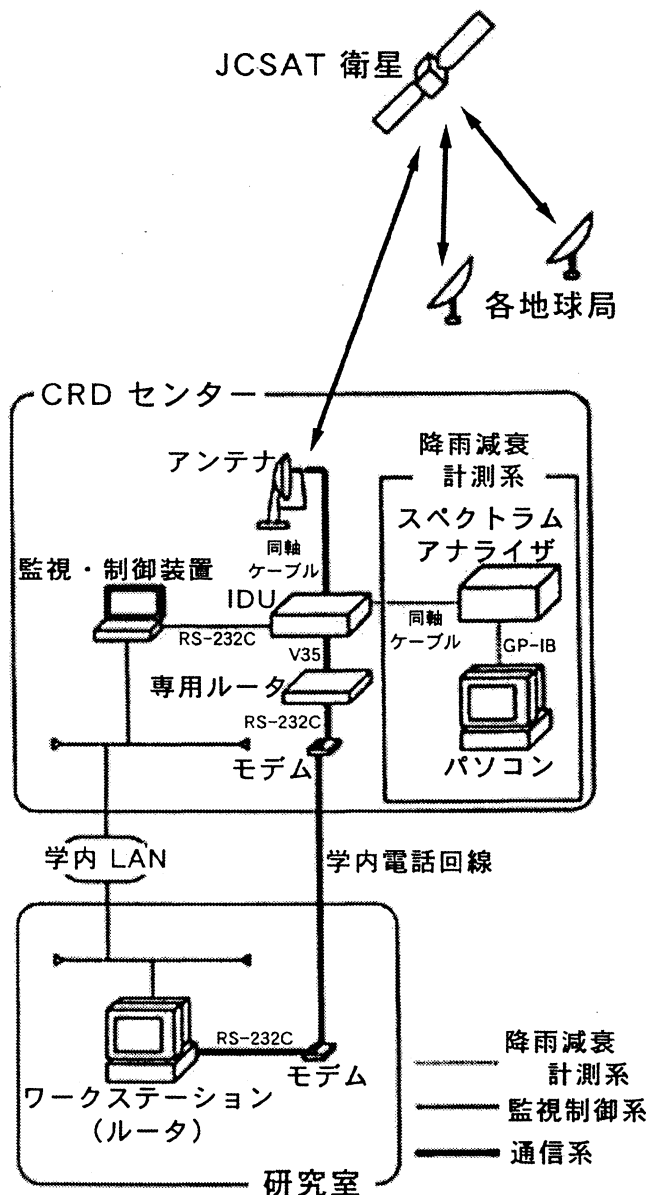


図1 構築した衛星通信実験システムの概観図

*1 K バンド (12~30 GHz 帯) の下側 (K under) の帯域で, 12.0~18.0 GHz 帯を意味する.

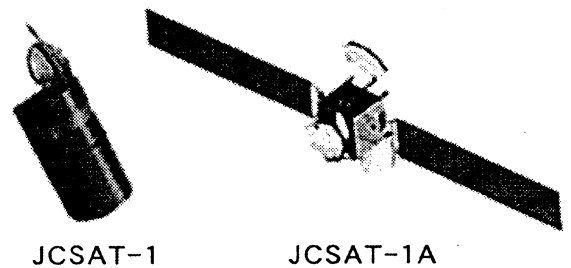


図2 JCSAT 通信衛星の外観図^{*2}



図3 本学地球局からの JCSAT-1/-1A 衛星の方向

*2 (株) 日本サテライトシステムズのホームページ (<http://www.ijnet.or.jp/JSAT/index.html>) からの引用.

2.2 超小型地球局について

本学キャンパス南端に位置する地域共同研究開発センター (CRD センター) に設置されている超小型地球局は NEC 製 VSAT システム NEXTAR で (図4参照), 有効径 1.8 mφ のオフセット・パラボラ・アンテナと室外装置 (Out Door Unit; ODU) および室内装置 (In Door Unit; IDU) から成る^[9].

本学地球局の送信 (Up Link) および受信 (Down Link) 周波数は, 14,003.75 MHz および 12,255.75 MHz である. アンテナの先端にある ODU は, 主に信号の増幅および中間周波 IF (送信 1.25 GHz 帯, 受信 0.50 GHz 帯) への周波数変換を行っている.

図5下段に外形を示した IDU は, 信号の変調/復調および暗号化 (スクランブル) /復号化 (デスクランブル) 等の処理を行うとともに, VSAT システムに関する各種の自動監視・制御を行っている. 自動監視・制御に関する主な項目は,

- 受信信号強度を監視し, 信号強度が一定になるように VSAT システム内の各種増幅器の増幅率 (ゲイン) を自動調整する AGC (Auto Gain Control).
- 受信信号周波数を監視し, 受信中心周波数からのオフセット (RX Frequency Offset) を自動的に補正する AFC (Auto Frequency Control).
- 1 bit 当たりの信号に対する雑音の程度を評価する, 1 ビット当たりのエネルギー対雑音電力密度比 E_b/N_0 ^[10] の自動計測.
- 受信した総ビット数に対する誤って受信されたビット数の比である符号誤り率 (Bit Error Rate) BER^[11] の自動計測.

である. 受信周波数の変更により実現できる通信相手 (受信チャンネル) の選択も, IDU で行う.

続している計算機から行うことができる. また, 回線状態の長期変動を保存するために, $AGC \cdot E_b/N_0 \cdot RX$ Frequency Offset $\cdot BER$ の 180 秒毎の測定結果 3 回分を加算平均して, 値をログとしてハードディスクに保存するようになっている (図6参照).

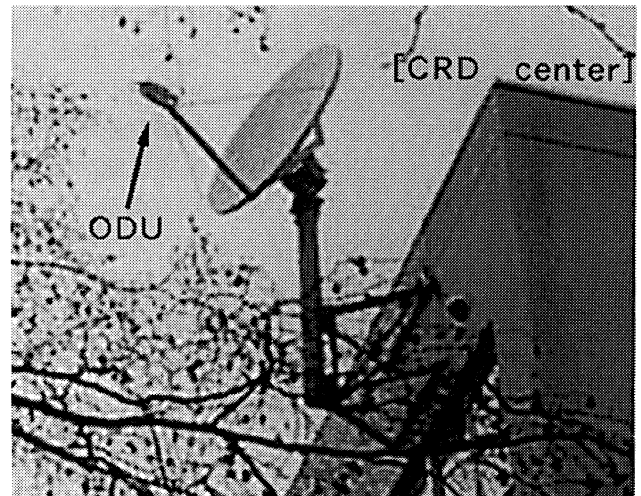


図4 アンテナおよびODUの設置状態

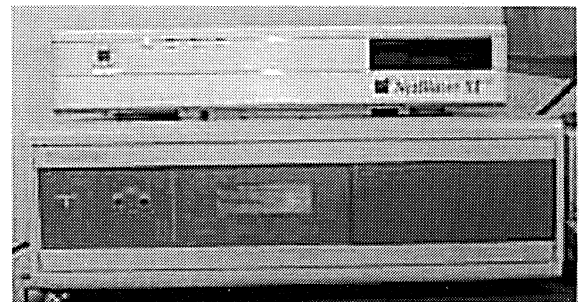


図5 専用ルータ (上) と IDU (下) の外形図

3. 超小型地球局の遠隔監視・制御について

2.2 節で概説した衛星回線の監視および制御は, CRD センター内の実験室に設置されている IDU 前面の制御パネル (図5参照) により手動でも行えるが, 計算機を IDU の Monitor & Control 端子にシリアル (RS-232C) 接続することによっても行える.

今回構築したシステムでは, 旧式のノート型パソコン (東芝製 DynaBook V386/25, 6 MB RAM, 200 MB HDD) にフリーの PC-UNIX (FreeBSD 2.2^[12]) をインストールし, 自作の遠隔監視・制御ソフトウェア^[13]を稼働させている. 本パソコンは Ethernet アダプタにより学内 LAN に接続されているので, 遠隔端末 (telnet) コマンド等を使うことにより, 通信相手の変更や装置/回線の状況 (送信電力や受信周波数など/AGC, E_b/N_0 , RX Frequency Offset, BER の値など) の確認を学内 LAN に接

kterm				
1998 Feb 4	time	AGC level	E_b/N_0	RX Freq. ofs bit error rate
0:11:32	3.9000000	10.0000000	1.4000000	0.0000000
0:21:27	3.8666667	10.0000000	1.4000000	0.0000000
0:31:22	3.9000000	10.0000000	1.4000000	0.0000000
0:41:18	4.0333333	10.0000000	1.4000000	0.0000000
0:51:13	4.1000000	10.0000000	1.3333333	0.0000000
1: 1: 8	4.0666667	10.0000000	1.3000000	0.0000000
1:11: 3	4.0333333	10.0000000	1.3000000	0.0000000
1:20:58	4.0666667	10.0000000	1.3000000	0.0000000
1:30:53	4.0000000	10.0000000	1.3000000	0.0000000
1:40:49	4.0000000	10.0000000	1.2000000	0.0000000
1:50:44	4.1000000	10.0000000	1.2000000	0.0000000
2: 0:39	4.0666667	10.0000000	1.2000000	0.0000000
2:10:34	4.1666667	10.0000000	1.2000000	0.0000000
2:20:30	4.2000000	10.0000000	1.2000000	0.0000000
2:30:25	4.2666667	10.0000000	1.1000000	0.0000000
2:40:20	4.2000000	10.0000000	1.1000000	0.0000000
2:50:15	4.3000000	10.0000000	1.1000000	0.0000000
3: 0:10	4.3666667	10.0000000	1.0666667	0.0000000
3:10: 6	4.3333333	10.0000000	1.0000000	0.0000000
3:20: 1	4.3000000	10.0000000	1.0000000	0.0000000
3:29:56	4.3333333	10.0000000	1.0000000	0.0000000
3:39:51	4.4333333	10.0000000	1.0000000	0.0000000

図6 回線状況のログの例

4. 降雨減衰計測系について

受信信号強度を調べるため、IF 受信信号を IDU の AUX-OUT 端子から取り出して計測する (図 1 の降雨減衰計測系の部分を参照)。IF 信号は、ADVANTEST 社製のスペクトラム・アナライザ R4136 にて周波数分析および加算平均処理されて、GP-IB を介してパソコン (NEC 製 PC-98XL, 1.6 MB RAM, 1.0 GB HDD, MS-DOS 6.2) のディスクに電波強度データとして格納される。本計測系の制御は、パソコン上の自作のプログラム^[14]によって自動化されている。例えば、突然の停電等によりシステムダウンした後で計測系に再び電源が投入された時、本プログラムはディスク上の既存のデータ・ファイルを可能な限り修復するとともに、スペクトラム・アナライザの各種設定を行って自動的に計測を再開する。現在 5 分間隔でデータを収集している。

受信信号の変動は、ドリフト等による静止衛星の位置移動や VSAT システムの性能変動によっても生ずるが、伝搬路上の雲や降雨・降雪による電波減衰に強く依存する。本計測系はこの信号減衰の観測を目的としているが、通信システムである VSAT は、通信状態を一定に保つ目的で系のゲインを変化させる AGC (Auto Gain Control) 機構が常に動作し、受信信号レベルのみから減衰量を得ることはできない。そこで、系のゲイン変化が受信雑音レベルも変えることに着目して、本学の受信チャンネルの信号レベル (受信信号レベル) と使われていない近傍チャンネルの信号レベル (受信雑音レベル) を調べて、次式から減衰量を算出する。

$$\begin{aligned} (\text{減衰量}) = & (\text{受信信号レベルの減少分}) \\ & + (\text{受信雑音レベルの増加分}) \quad \text{--- (1)} \end{aligned}$$

本計測系の性能評価は、以下のように行った^[15]。晴天時 (1994 年 10 月 24 日 0 時 00 分) の受信信号スペクトラム例を図 7 に示す。中央の 505.75 MHz が本学の受信チャンネルであり、他に信号が観測されている 505.45, 505.55 MHz が東北学院大学および電気通信大学のチャンネルである。降雨・降雪時の信号レベル変動例として、1995 年 1 月 7 日の結果を図 8 に示す。午前 11 時頃に、本学の自局折り返し信号 (受信信号レベル) が最大で 3.5 dB 程度低下し、受信雑音レベル (信号が観測されなかった 505.65 MHz のチャンネルの値) が 7.7 dB 程上昇した。この結果を (1) 式に代入して減衰量を求めると、11.18 dB の最大減衰量を示す図 9 の結果となった。また、この日の AGC の値の変化をプロットすると図 10 となり、最大減衰量は 11.59 dB であった。積雪によるアンテナ表面の変化や外気温変化に伴う ODU の性能変動等に起因する信号減衰についての詳細な検討も必要であるが、上記の結果から本計測系は 1 dB を十分越える降雨減衰の観測は可能であると判断した。

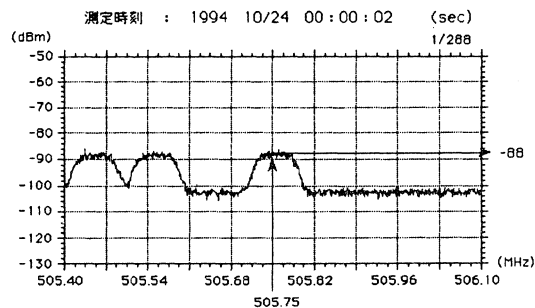


図 7 晴天時の受信信号の周波数スペクトル例

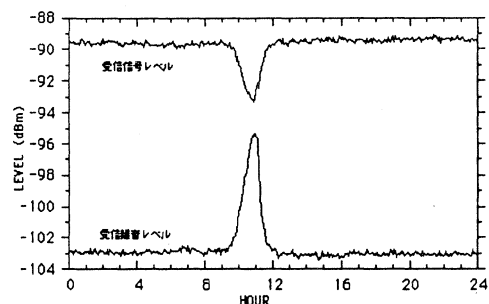


図 8 降雨・降雪時のレベル変動例

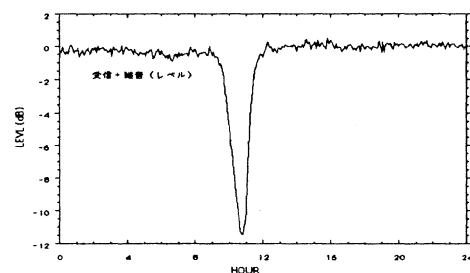


図 9 図 8 から求めた減衰量の変化例

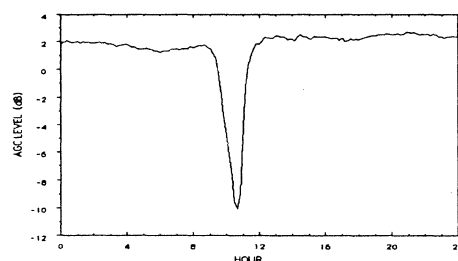


図 10 AGC レベルの変化の例

この検証例では自局折り返し信号を観測していたので、本計測値と AGC の値は原理的に同じ結果を示す。しかし、通常の通信時において、AGC の値は本学 - 衛星間の降雨・降雪等による減衰のほかに相手局 - 衛星間の減衰に依存して変化する。本計測系は本学 - 衛星間の減衰のみを計測することができるので、相手局と

の使用周波数の差および衛星 - 地球局間の伝搬路長の差が減衰量に及ぼす効果を無視すれば^{*1}, 相手局 - 衛星間の減衰量も推定できる。

本計測系を用いた降雨減衰の観測は, 学内に設置されている雨量計が休止状態になる冬季間を除いて現在も継続して実施しており, 雨量計から得られる降水強度との比較・検討も可能となっている^[16, 17]。

5. 通信・ネットワーク系について

本通信実験システムにおける通信経路は, 図1に太線で示されている。衛星からの信号は, IDUにおいて復調・デスクランブルなどの処理が行われ, デジタル信号として V35 インターフェイスを介して TELEBIT 社製の専用ルータ NetBlazer ST (図5上段を参照) に到達する。このルータは, シリアル・ラインや電話回線用のインターネット・プロトコル (IP)^[18] である PPP (Point to Point Protocol) および SLIP (Serial Line Internet Protocol)^[18] をサポートしているので, シリアル (RS-232C) ケーブルによりコンピュータと接続できる²。

本学の構成では, この専用ルータを RS-232C ケーブルによりモデム (デジタル電話機) に接続し, 学内電話回線を経由してキャンパス北端の当研究室まで通信路を延長している。研究室側のモデムは, RS-232C ケーブルにより, ワークステーションに接続されている。専用ルータとワークステーションとの間の通信プロトコルは, 実装が簡単な SLIP を用いた。このワークステーションは Ethernet により研究室 LAN (学内 LAN) にも接続されているので, 学内 LAN 上の任意のコンピュータから, 学内 LAN ~ 本ワークステーション ~ 学内電話回線 ~ 本学の専用ルータ ~ 本学 IDU ~ 衛星回線 ~ 共同研究先の IDU ~ 共同研究先の専用ルータを経由して, 共同研究先のコンピュータまたは共同研究先の LAN に接続する事が原理的に可能となった (図1参照)。

*1 UnSAT 協議会の下で研究を行っている共同研究先は, 同じ中継器 (帯域幅 27 MHz) を利用しており, 各局の周波数の差異が降雨減衰等に与える影響は近似的に無視できる。但し, 本衛星には 3 MHz の中継器間隙を設けて同一偏波面用に 16 本の中継器が搭載されており, 異なる中継器を利用した地球局間の通信では最大 500 MHz 程度の周波数の差が生ずる。この場合は, 周波数による減衰量の違いを考慮する必要があると思われる。また, 国内通信に限定すれば, 衛星 - 地球局の距離に比べて地球局間の距離は十分短いので, 伝搬路長の差異も無視できるとと思われる。

*2 共同研究先である北大側の通信経路は, このような構成である。

表1 ルーティング・テーブル

パケットの宛先, 送信先の IP アドレス	選択される経路 (選択される I/F)
ルータ (ワークステーション) 用	
共同研究先 (北大)	学内電話回線 (Serial I/F)
共同研究先以外	研究室・学内 LAN (Ethernet I/F)
専用ルータ用	
本学	学内電話回線 (Serial I/F)
本学以外	衛星回線 (V35 I/F)

インターネットを含めたデジタル通信では, 情報を特定の大きさのパケット (packet, 小包) に分割し, 各パケットに送信先や送信元のアドレス (例えば IP アドレス^[18]) などを附加して通信路に流すパケット通信が主流である^[19]。学内 LAN からのパケットは, (i). 通常インターネットと呼んでいる地上専用回線経由の他に (ii). このワークステーションを介した衛星回線経由でも共同研究先に届けられるので, 何らかのルールに基づいた経路の選択・制御 (routing) が必要になる³。適切な経路選択機構の設定のためには, 「地上専用回線の混雑時に一部のパケットを衛星回線に流す」とか, 「特定のサービスに参与するパケットを衛星回線に流す」などの経路選択のルールについて, 学内 LAN 関連部局および共同研究先と合意する必要がある。

我々は, 経路制御方式として衛星インターネットで発案されている代理サーバ (proxy server) 利用方式^[3]の採用を計画しているが, 現在, 学内 LAN の経路制御に影響を及ぼさないように, 以下に示す非常に単純な経路制御ルールの下での接続確認実験を行っている。

- 衛星回線へのアクセスは, 図1中に示したワークステーションに限定する。他の計算機から利用したいときには, 遠隔端末 (telnet) コマンド等でこのワークステーションに入って使用する。
- 衛星回線を利用した通信相手は, 共同実験先 (当面は北大) に限定する。
- 衛星回線経由で届いた本学学内 LAN 上の計算機宛のパケットは, 研究室 LAN を経由して学内 LAN に流す。

*3 何もしなければ, 学内 LAN の現状の経路制御ルールにより, 全てのパケットは地上専用回線を経由して学外に送られる。

具体的には, このワークステーション上で経路制御用常駐プログラム (ルーティング・デーモン *routed*^[20]) を稼働させ, 経路制御情報 (routing table) として表 1 の「ルータ (ワークステーション) 用」のルールを与える. CRD センターにある専用ルータ用の経路制御情報は, 表 1 下段の「専用ルータ用」を使用する. この経路制御により, このワークステーション以外の学内 LAN に接続されている計算機からのパケットは, 共同研究先宛のものも含めて全て地上専用回線に流れる. また, このワークステーションから送出されるパケットのうち, 共同研究先宛のパケットのみがシリアル・インターフェイス (Serial I/F) から学内電話回線を通り専用ルータを経て衛星回線に流れるが, 他の宛先を有するパケットは Ethernet I/F から地上専用回線の方向に流される. 逆に, 衛星回線経由で届いた本学宛の全パケットは, 専用ルータの Serial I/F から学内電話回線・ワークステーションを経由して, 研究室 LAN・学内 LAN に流れる.

6. まとめ

これまで構築作業を行ってきた, JCSAT-1A 衛星回線 (64 Kbps) と VSAT を利用した衛星通信実験システムの構成要素 i). 遠隔監視・制御系, ii). 降雨減衰自動計測系, iii). 通信・ネットワーク系の現状の性能と機能について述べてきた. 本システムの大きな特徴は,

- (a). 学内 LAN を含めたネットワーク上の計算機から, システムの監視や制御および通信に関する実験が可能であること.
- (b). 通信実験中も, 降雨減衰データの収集や BER などの回線状態に関するログの収集ができること.
- (c). システム監視・制御機構は, 小さな独立した要素に分けて配置してあるので, ソフトの自作も可能となり, 維持・改良は比較的容易になったこと.

である.

衛星通信実験用システムの基本部分の構築作業はこれでほぼ完成したので, 今後も室蘭地区における衛星回線特性解明のための基礎データ収集を継続するとともに, 「衛星インターネット」のための研究 (代理サーバ (proxy server) 利用方式を用いた汎用的な経路制御の確立やセキュリティを考慮した 1 対多通信技術の研究など) を共同研究先とともに進める予定である.

謝 辞

本研究で使用している衛星通信回線に関してご協力いただいている「ディジタル衛星通信の大学間高度共

同利用研究 (UnSAT) 協議会」および (株) 日本サテライトシステムズに深謝致します. 共同研究プロジェクト^[21]の一員として, 衛星通信システムに関して種々の御教示をたまわるとともに通信実験に協力していただいている, 北海道大学工学部電子情報工学専攻の青木 由直 教授, 棚橋 真 助手, 北海道工業大学応用電子工学科の初田 健 教授に感謝いたします. また, VSAT の監視・制御用プログラムについて有益な情報を提供してくださいました群馬大学工学部情報工学科の嶋本 薫 助教授および衛星回線の運用に関して特に協力いただいている本学 CRD センターの黒島 利一 技官にお礼申し上げます.

最後に, 本システム構築実験に参加してくれた当研究室の卒業生 太田慎也 君 ((株) 日立製作所), 小林克也 君 (北海道開発庁), 最能広人 君 ((株) アルファシステムズ), 秋本大助 君 ((株) シーズ・ラボ), 千葉卓也 君 ((株) 横河技術情報), 竹谷弘 君 (北海道エニコム (株)), 寺崎仁司 君 (NTT) に感謝します.

参考文献

- [1]. 野坂邦史, 村谷拓郎: 新版 衛星通信入門, オーム社, (1994) pp.178-227
- [2]. 福田紳二: 岐路に立つ Internet インフラストラクチャ, SUPER ASCII, 9, 3, (株) アスキー, (1998) pp.82-115
- [3]. 舟越弘: インターネットの仕組み (16), 日経コミュニケーション, 258, 日経 BP 社, (1997) pp.166-167
- [4]. 多田信彦, 馬場始三: 「第 1 回インターネットインターネット防災訓練」報告, UNIX MAGAZINE, 11, 3, (株) アスキー, (1996) pp.121-124
- [5]. VSAT 衛星通信システム普及促進協議会: VSAT'92 -VSAT システムの概要と利用の現状-, 平成 3 年度普及委員会報告書, (1993) pp.1-19
- [6]. 島田博明, 八木驍, 藤井章: VSAT システムの現状, NEC 技報, 41, 6 (1988) pp.3-8
- [7]. 青木由直, 棚橋真, 初田健, 他: 通信衛星による簡易テレビ会議システムの開発と実験, 情報処理北海道シンポジウム '96, p.71 (1996)
- [8]. 宮田要, 青木由直, 棚橋真, 他: 視覚言語に対する伝送回線容量と遅延の影響, 1996 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, p.238 (1996)
- [9]. 玉川晋, 福田祐郎, 高原穆之, 他: VSAT 端局装置, NEC 技報, 41, 6 (1988) pp.21-27
- [10]. 野坂邦史, 村谷拓郎: 新版 衛星通信入門, オーム社, (1994) pp.107-109
- [11]. U.D.Black (西田竹志, 板坂大作 訳): 情報ネットワークシステムの基礎, (株) トッパン, (1995) pp.162-164
- [12]. あさだたくや, 天川修平, 衛藤敏寿, 他: FreeBSD 徹

- 底入門, 翔泳社, (1997) pp.1-98
- [13]. 鈴木真也, 竹谷弘, 岡和喜男, 他: JCSAT 衛星地球局の遠隔監視・制御システムの構築について, 平成8年度室工大開発技術研究会, pp.1-2 (1998)
- [14]. 寺崎仁司, 秋本大助, 岡和喜男, 他: 通信衛星用超小型地球局を用いた降雨減衰自動計測系の構築, 信学技報, CS95-56 / OCS95-22, pp.1-8 (1995)
- [15]. 岡和喜男, 畑中雅彦, 秋本大助, 他: JCSAT 通信衛星 - 室工大実験局間の降雨電波減衰測定について (2), 噴火湾研究, 4, pp.33-36 (1995)
- [16]. 千葉卓也, 岡和喜男, 畑中雅彦, 他: JCSAT 通信衛星 - 室工大実験局間の降雨電波減衰測定について (3), 平成7年度電気関係学会北海道支部連合大会, p.255 (1995)
- [17]. 岡和喜男, 畑中雅彦, 杉岡一郎, 吉田豊: JCSAT 通信衛星 - 室工大実験局間の降雨電波減衰測定について (5), 平成8年度室工大開発技術研究会, pp.15-16 (1998)
- [18]. 砂原秀樹, 石井秀治, 植原啓介, 林周志: プロフェッショナル BSD, (株)アスキー, (1994) pp.85-116, pp.425-429
- [19]. 辻井重男, 河西宏之, 宮内充: ネットワークの基礎知識, 昭晃堂, (1997) pp.78-84
- [20]. 砂原秀樹, 石井秀治, 植原啓介, 林周志: プロフェッショナル BSD, (株)アスキー, (1994) pp.158-159, p. 432
- [21]. 青木由直, 棚橋真, 川嶋稔夫, 他: 通信衛星を用いた知的画像通信の共同研究 (1), 平成6年度電気関係学会北海道支部連合大会, p.275 (1994)

WWWにおけるJava Appletの性能評価実験

渡辺 操^{*1}, 畑中 雅彦^{*1}, 田島 和典^{*2}, 青木 貴^{*2}

An Experiment to Estimate Efficiency of Java Applet on WWW

Misao WATANABE, Masahiko HATANAKA, Yasunori TAJIMA and Takashi AOKI

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

Today, in The Internet, there are many accesses from indefinite client machines to a World Wide Web (WWW) server, at a time. If the WWW server accepts the requests from clients in traditional ways such as Common Gateway Interface (CGI) and/or Server Side Include (SSI), the load of this server is increased in proportion to the number of client machines. To reduce the load of server, there is distributed processing approach: the WWW server sends applet code with some data to the client instead of processing its request directly, and the applet code runs on this client to do its own request. We have studied to evaluate efficiency of applet code on WWW environment in comparison with SSI code. In this paper, we report an experimental result which shows that distributed processing approach using small portable applet is more promising than simple server-clients method using its native SSI code, for Intranet environment such as a laboratory network.

Key words : WWW, Common Gateway Interface, Server Side Include, Applet, Java

1. はじめに

今日、電子メールや World Wide Web (WWW) に代表されるインターネット (The Internet) サービスは社会に広く・深く浸透しており、現代人にとって必要不可欠なものになりつつある。特に、マルチメディア情報の公開・交換・収集に優れている WWW 技術は、不特定多数を対象とするインターネットのみならず、組織内部の情報流通・公開を目的としたイントラネット (Intranet)^[1] システムにも利用されている。

WWW では、情報を保持し提供する Web サーバと情報を入手して表示する Web クライアント (ブラウザ browser) が基本構成要素となるが、情報検索も含

めたより高度な情報提供を可能にするために、Web サーバの背後にデータベース・サーバを配置するシステムが急増している^[2]。このようなシステムでは、Web クライアントからの要求を適切に処理してデータベース・サーバに渡したり、データベース中のデータを Web クライアントが表示できるように変換して Web サーバに渡すなどの処理が必要になる。従来これらの処理の大部分は、CGI (Common Gateway Interface)^[3] や SSI (Server Side Include)^[4] 等の外部プログラムにより Web サーバ側で行われてきた。しかし、インターネットに代表されるネットワーク・システムの普及により、同一の Web サーバに多数のブラウザからの要求が同時に発生する頻度が増えており、サーバの負荷の増大に起因するシステム障害が問題になってきている。特に、CGI や SSI 方式では追加処理をサーバ側で行なうため、サーバの安全性と高速性の維持は難しくなる傾向にある。

^{*1} 情報工学科

^{*2} ニッテツ北海道制御システム(株)

一方, WWW の対話型アプリケーション開発言語として登場した Java は, Web クライアント上で動作するプログラム (Applet) を実現させた. CGI や SSI で行っていた処理の大部分を肩代わりする Applet をブラウザに送り込めば, これらの処理は各ブラウザ上で行われるのでサーバの負荷が軽減する可能性がある^[5]. しかし, プラットホーム独立性を重視した Java はインタプリタ言語であり, Applet の処理速度は高くない等の欠点も有している.

そこで我々は, WWW を対象に Applet による (ブラウザ上での) 分散処理の特性および性能について, サーバ側での集中処理とみなせる SSI との比較により評価する実験を検討した.

現実の WWW 環境で要求される処理は, 動画や音声データをも含めたマルチメディアに関する複雑で多様な処理へと移行しつつある. しかし, これら複雑な処理を直接対象として, サーバ集中型処理方式とクライアント分散処理方式に関する再現性のある基本的な特性を得ることは困難と考え, 今回は, データ処理の基本操作の一つである整列を題材に実験を行ったので, その結果について報告する.

2. SSI 方式と Applet 方式の概要

サーバ側での処理方式として CGI 方式もあるが, 実行途中で利用者の入力作業を必要とするなど処理時間の計測が煩雑なので, 今回の実験では SSI 方式のみを採用した.

SSI では, 外部プログラムはサーバ上の HTML ファイルから起動され, 処理結果はサーバ上の HTML ファイルに反映される^[4]. ブラウザは処理結果を含

んでいる HTML ファイルを受け取って表示するだけであり, 殆どの処理はサーバ側で行われる (図 1 参照).

Applet 方式では, ブラウザが受け取った HTML ファイルから外部プログラム (Applet) の送付要求が出され, Web サーバから受け取った外部プログラムをブラウザ上で動作させて, 処理結果を得て表示を行なう (図 2 参照). 即ち, HTML ファイルと外部プログラムは, サーバから個別に送信される^[6].

3. 実験に使用したプログラム開発言語について

Applet 作成に使用する Java 言語環境では, ソースコードは, 一度コンパイラによって中間コード (バイトコード) に変換される. そして実行時に, インタプリタがバイトコードを解釈して, 機械語レベルの翻訳作業を行なう. インタプリタを用いることで, 処理速度はコンパイラ言語に比べて 10 倍程遅くなる^[5]. しかし, 最近の Java 言語環境では, インタプリタによる処理速度の低下を抑えるために, 実行時にバイトコードの一部をそのマシンのネイティブコードに変換 (コンパイル) する JIT (Just-In-Time) コンパイラが導入されている^[7].

本実験では, JIT コンパイラの有無が Applet の処理速度に与える影響についても調べる. 参照実験として, SSI 方式についてもインタプリタ型言語とコンパイラ型言語で作成した同様のプログラムを用いて, 性能評価を行なった. 今回用いた言語は, 前者として Perl を, 後者として C を選択した. 両言語とも SSI や CGI 用の外部プログラム作成時に, 広く用いられているものである.

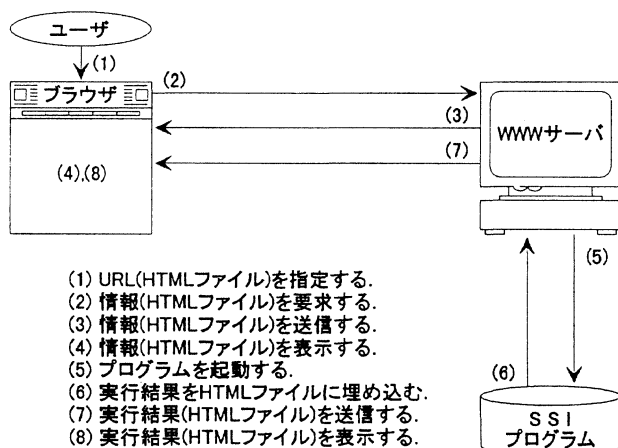


図1 SSI を用いた場合の処理の流れ

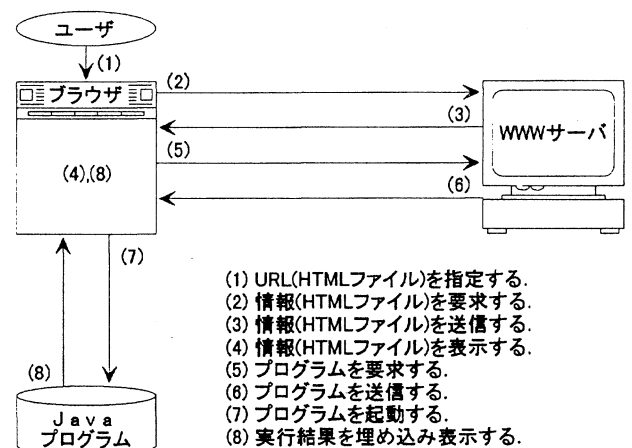


図2 Applet を用いた場合の処理の流れ

4. 実験方法と実験システムについて

4.1 SSI 方式と Applet 方式の性能比較実験

性能計測のために用意したテスト用外部プログラム(図3の処理A)は、ランダムに並んでいる多数の数値データからなるWebサーバ上のファイルを読み込んで、バブル・ソート^[8]により整列化(sorting)を行い、ブラウザ上に整列後の結果を表示させる処理を行なうものである。ファイル上の数値データはテキスト形式で保存されており、そのデータ長はデータ1件当たり12 Byteで、データ数nは100~3000個とした。SSI用テスト・プログラムは、C言語版はGNU C 2.7を、Perl言語版はPerl 5.0.0.3を使って作成した。Applet用テスト・プログラムはJava開発環境JDK 1.1.5により作成した(表1参照)。

SSI方式とApplet方式での処理時間の計測は、図3に示すHTMLファイル・プログラムにより、ブラウザからの要求(アクセス)発生直後の時刻と処理終了直前の時刻から、処理時間を算出した。

実験に用いた計算機の主な諸元とネットワークの構成を、表1、2および図4に示す。一部高速イーサネット(100 Mbps)が存在するが、10 Mbpsの通常のイーサネットが基本となっており、全ての計算機はハブまたはスイッチング・ハブでネットワークに接続されている。図4のUNIX計算機(S)がサーバ・マシンであり、WebサーバとしてApache^[9]が稼動している(表1参照)。図4の(a)~(g)の7台のWindows計算機がクライアント・マシンであり、ブラウザ・ソフトとしてNetscape社のCommunicatorが動作している(表2参照)。

Applet実行時のJITコンパイラ使用有無の選択は、Communicatorが使用するJITコンパイラ用ライブラリ(DLL)の追加・削除によって実現した。計測は5回繰り返して行ない、その平均値を計測値とした。また、

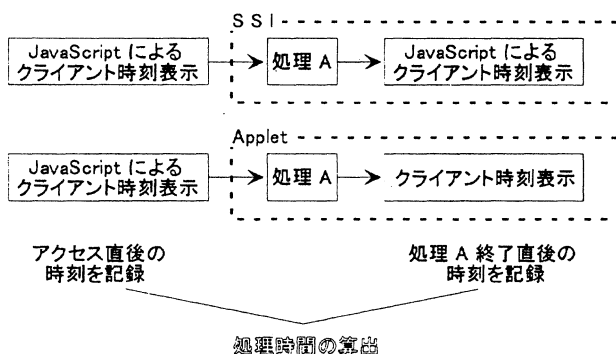


図3 処理時間計測用HTMLファイルの構成

表1 WWWサーバ・マシンの諸元

	CPU /Clock(MHz)	RAM	OS	Software
(S)	μ SPARC-II / 70	48MB	Solaris 2.51	Apache 1.1.3 GNU C 2.7 Perl 5.0.0.3 JDK 1.1.5

表2 クライアント・マシンの諸元

	CPU /Clock(MHz)	RAM	OS	Software
(a)	Pentium-II / 300	64MB	Windows 95	Netscape Communicator 4.04
(b)	AMD-K6 / 200	64MB		
(c)	PentiumMMX / 166	32MB		
(d)	PentiumMMX / 120	32MB		
(e)	Pentium / 133	24MB		
(f)	Pentium / 100	32MB		
(g)	Pentium / 75	32MB		

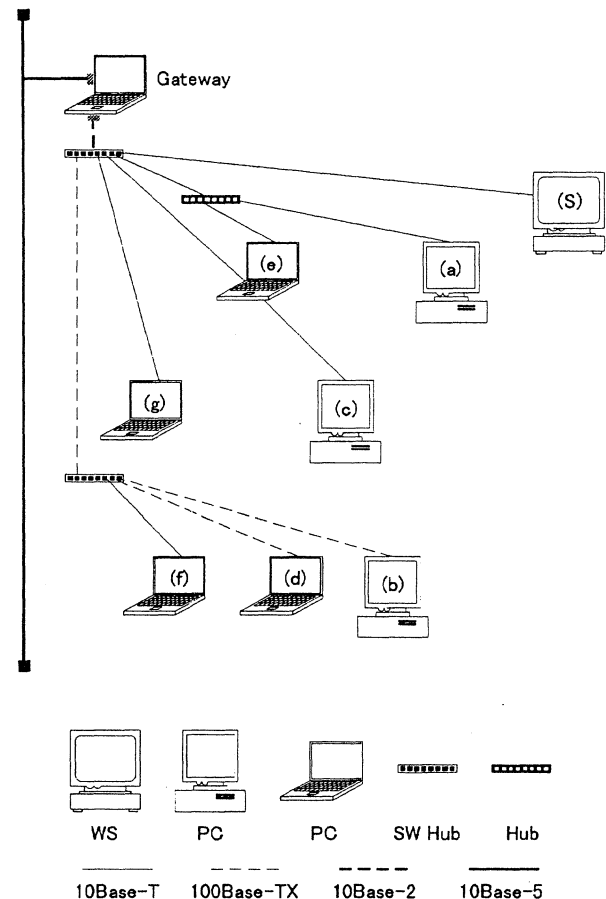


図4 実験に用いたネットワークシステム

Communicator が有するキャッシュ機能の影響を取り除くため、計測前に必ず毎回キャッシュをクリアしながらホーム・ページをリロードする操作を行った。

4.2 使用したブラウザ・マシンの性能評価実験

上記テスト用 Applet (バブル・ソート) のブラウザ上での処理速度は、各ブラウザ・マシンの性能に強く依存すると予想される。この計測結果とブラウザ・マシンの性能の関係を調べるために、Windows95 用のフリーのベンチマーク・テスト HD Bench 2.6.10^{*1} および Communicator 上で動作するフリーのベンチマーク Applet JMARK 2.0^{*2} を用いて各ブラウザ・マシンのベンチマーク・テストを行った。

5. 結果と考察

5.1 テスト・プログラムの動作確認

図3に示す HTML ファイル内の一連のプログラムの動作確認を兼ねて、Web サーバと表2 (図4) に示したブラウザ・マシン (a) 1 台の構成におけるバブル・ソート処理時間を計測した。結果を図5に示す。図中の記号で、C, Perl は C 言語および Perl 言語によるテスト・プログラムを用いた SSI 方式での結果、Java-JIT, Java は JIT コンパイラ有り、無しでの Applet 方式での結果である。データ数を n とするとバブル・ソートの時間計算量は $O(n^2)$ であるが^[8]、図5の結果を2次関数でカーブ・フィットしたところ非常によく近似できている。このことから、今回作成した計測用プログラム (図3参照) が正常に動作したと判断した。

図3から、処理時間 T は、SSI 方式であるか Applet 方式であるかよりも使用した言語に強く依存しており、コンパイラ型言語の処理時間 (C 言語 $T \sim 3.61 \times 10^{-6} n^2$) は、インタプリタ型言語の処理時間 (Perl 言語の場合 $T \sim 5.69 \times 10^{-5} n^2$, JIT コンパイラ無しの Java 言語の場合 $T \sim 3.61 \times 10^{-4} n^2$) より極端に短くなっている。バイトコードを一部コンパイルする JIT コンパイラ有りの Java 言語の場合は、 $T \sim 2.01 \times 10^{-5} n^2$ となり、両者の中間の結果となった。特に C プログラムによる SSI 方式は、圧倒的に高速であった。同じ Applet でも JIT コンパイラの有無により、処理時間に大きな差が生じた。以上の結果より、C と Perl

を比較すると、C の方が16倍、JIT コンパイラ有りの Java と JIT コンパイラ無しの Java を比較すると JIT コンパイラ有りの Java の方が18倍の処理速度であることが確認できた。JIT コンパイラの効果が判明したので、以後の Applet の実験は JIT コンパイラ有りの条件下でのみ行った。

5.2 Web サーバへの同時アクセス時の結果

次に、Web サーバに同時にアクセスするブラウザ・マシンの数を変化させて、処理時間を計測した。SSI 方式では、全ブラウザからの要求をサーバ側で処理するので、原理的には処理時間はブラウザ・マシンの数に比例して増加する。逆に Applet 方式では、処理は各ブラウザ・マシン上で実行されるので、処理時間はマシン数に依存しないと予想される。ただし、処理時間はブラウザ・マシンの性能に左右される。

図6に、マシン (a) 上で計測したデータ数 n が

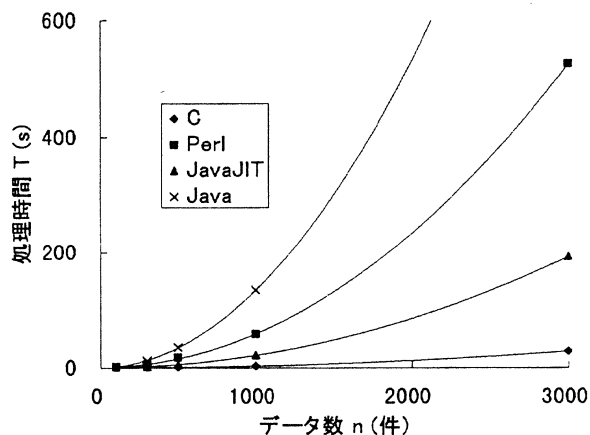


図5 ブラウザ・マシン (a) 1 台の時の結果
(処理データ数 n とバブル・ソート処理時間)

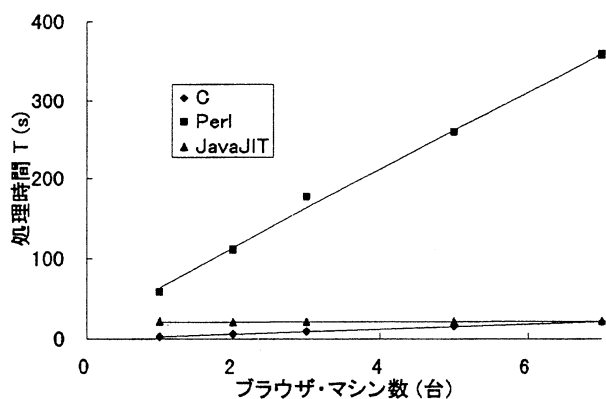


図6 ブラウザ・マシン数と処理時間との関係
(ブラウザ・マシン (a) 上にて計測)

^{*1} <http://www.lares.dti.ne.jp/~ep82kazu> 参照

^{*2} <http://www.zdnet.com/zdbop/jmark/jmark.html> 参照

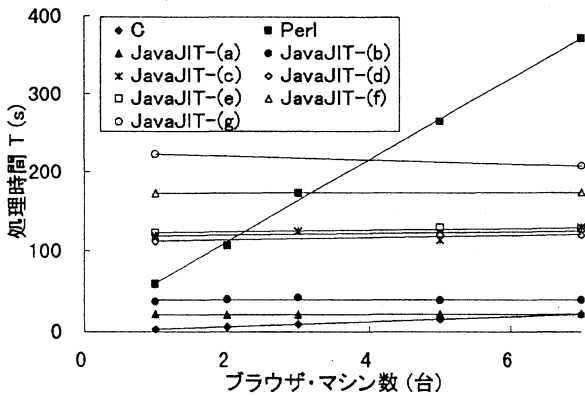


図7 各ブラウザ・マシンの 処理時間の結果

1000 件の場合の処理時間の結果を示す。SSI 方式 (図中の C と Perl) では、予想通り、ブラウザ・マシンの数に比例して処理時間が増加した。直線近似における傾きは、C の場合で 3.04 (s/台), Perl の場合は 52.28 (s/台) であった。これは、図 5 に示したデータ数 1000 件の時の処理時間 (C の場合は 3.61(s), Perl の場合は 56.9(s)) とよく対応している。図 6 の中で JavaJIT と示した測定値から、Applet 方式では、傾きが 0.12 (s/台) とほぼ水平となり、予想通り処理時間はブラウザ・マシンの数に依存しない結果となった。また平均処理時間は 21.08(s) で、図 5 で得られた値 20.1(s) に近い結果となった。

他のブラウザ・マシン (b)~(g) 上で計測した Applet による処理時間を、図 7 にまとめて示す。各ブラウザで処理時間は大きく異なるが、同時に要求を出しているブラウザ数には殆ど依存しない結果となった。(ブラウザ・マシン (a)~(g) の傾きの平均は 0.89 (s/台) で、ほぼ水平である。)

この実験結果から、C 言語プログラムを利用した SSI 方式と JIT コンパイラ付 Applet 方式における処理時間を評価すると、8 台のブラウザ・マシンが同時に SSI 方式サーバにアクセスすると、その処理時間は $3.04 \times 8 = 24.3(s)$ となり、マシン (a) クラスの性能を有する Applet 方式での処理時間 21.1(s) と同程度になる。しかし、マシン (b) クラスの性能を有するブラウザ・マシンでは、13 アクセスが同時に発生した時の SSI 方式の処理時間に等しい時間が必要であり、最も遅い (g) クラスのマシンでは、同時アクセス数が 70 程度ある SSI 方式に相当する処理時間が必要となる。

5.3 ベンチマーク・テストの結果

図 6, 図 7 から求めたバブル・ソート Applet の実

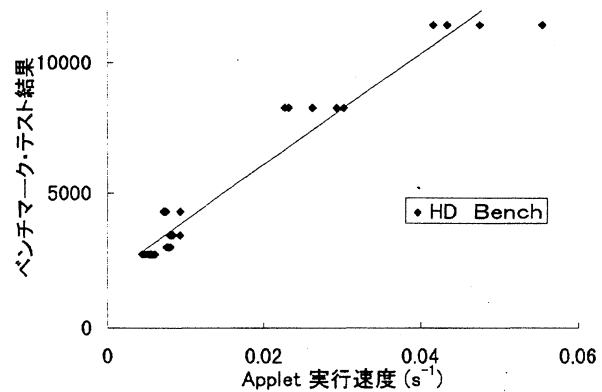


図8 Applet 方式でのバブル・ソート処理速度と HD Bench によるベンチマーク結果との関係

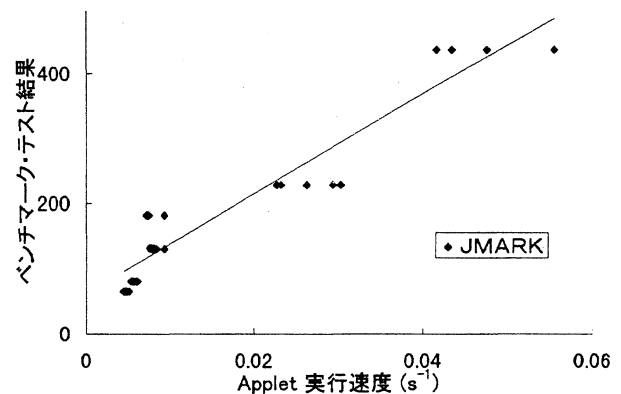


図9 Applet 方式でのバブル・ソート処理速度と JMARK によるベンチマーク結果との関係

行速度 (処理時間の逆数) を横軸に、HD Bench にて計測した各ブラウザ・マシンの総合ベンチマークの値を縦軸にとった結果および回帰直線 (相関係数は 0.97) を図 8 に示す。また、縦軸に JMARK で得られた Processor 性能指標をとった、同様の結果および回帰直線 (相関係数は 0.95) を図 9 に示す。

測定値にバラツキはあるが、本バブル・ソート Applet の処理速度は、ネイティブコードで書かれたベンチマーク・テスト HD Bench の結果に対しても、良好な比例関係を示した。このことから、本実験条件においては、複数のブラウザ・マシンからの同時アクセスによって生ずる Web サーバの性能特性の変化やネットワークの packets 転送能力の変化はなかったと思われる。

6. まとめ

本研究結果として着目すべき重要事項は, 1). コンパイラ言語とインタプリタ言語の実行形態による処理速度の差異, 2). Applet を実行する際の JIT コンパイラ使用の有無による性能への影響, 3). 複数ブラウザからの同時アクセスに対する WWW サーバにおける SSI 方式の特性, 4). 複数ブラウザからの同時アクセスに対する WWW サーバにおける Applet 方式の特性, 5). 実行速度から見た Applet の有用性, である. 以下, 上記の項目についてまとめる.

- 1). 計算量の大きな処理を伴う機能を Web サーバ側が提供するとき, その外部プログラムの開発言語の選択に注意が必要である. 今回用いた数値のソーティングでは, C のプログラムは Perl のプログラムのおよそ 16 倍のスピードがあった. しかし, コーディングの容易さ・文字列処理での有利さなど, Perl の有用性が無視できないのは当然のことである.
- 2). Java もインタプリタ言語であるが, JIT コンパイラを導入することで, およそ 18 倍の速度向上が得られた. Java の最新のバージョンでは, 更に高速化を目指した HotSpot^[10] と呼ばれる技術の導入が考えられており, 通常のコンパイラ言語に比べて遜色ない処理速度が得られる可能性もある.
- 3). SSI 方式の場合, ユーザの要求処理が一つのプロセスであれば, WWW サーバの機能には影響がない. しかし, 同時に多数のユーザから処理の要求があれば, その数だけ WWW サーバ上でプロセスが実行される. よって, ユーザの数に比例する形で WWW サーバの負荷は増大する.
- 4). Applet 方式の場合, ユーザの要求処理は一つのプロセスとして, ブラウザ・マシンで起動した Java のバーチャルマシン上でそれぞれ実行される. したがって, ブラウザ・マシン数が増加しても WWW サーバには影響がないので, 常に安定した状態で情報の提供が行なえる.
- 5). 我々が行った実験環境下では, 図 6 より, Applet 方式でのブラウザ・マシンに要求される性能の目安が (Web サーバの性能) / (同時にアクセスする可能性のあるブラウザの数) で与えられること, 10 台程度のブラウザからの同時アクセスがあれば Applet 方式が SSI 方式と同等以上の性能を発揮することが判明した. 勿論, この結果はブラウザ・マシンの性能に依存するが, サーバ用マシンのコスト・パフォーマンスの伸びと比べてブラウザ・マシンとしての PC のコスト・パフォーマンスの伸びが著しい

現状においては, Applet 方式がより優位になる場合が多いと思われる.

今回使用した Applet はコードサイズの非常に小さなプログラムであったが, 処理によっては大型の Applet の配送が必要な場合も考えられる. 使用可能なネットワーク帯域に大きく依存するが, この状況下で Applet の配送時間が大きなオーバ・ヘッドとなり, SSI 方式が圧倒的に優位となる場合も考えられる. WWW 技術を利用する現実の処理では, Applet のサイズはこれらの間の値となる場合が多いと想像される.

なお, 本研究の要旨の一部は, 室蘭工業大学開発技術研究会^[11]にて発表した.

参考文献

- [1]. 好川哲人: イントラネットとはなにか?, Open Design, 3, 5, CQ 出版社, (1996) pp.4-15
- [2]. 花井浩之: Web と外部プログラムの連携, Software Design, 142, 技術評論社, (1997) pp.18-27
- [3]. S.Gundavaram (田辺茂也 監訳): CGI プログラミング, オライリー・ジャパン, (1996) pp.1-55
- [4]. S.Gundavaram (田辺茂也 監訳): CGI プログラミング, オライリー・ジャパン, (1996) pp.95-110
- [5]. 有我成城, 衛藤敏寿, 佐藤治, 他: Java 入門, 翔詠社, (1996) pp.1-30
- [6]. 小松憲一: whatis Java, UNIX USER, 5, 6, ソフトバンク, (1996) pp.32-37
- [7]. Software Design 編集部: 保存版・Java 用語辞典, Software Design, 143, 技術評論社, (1997) pp.74-85
- [8]. 近藤嘉雪: C プログラマのためのアルゴリズムとデータ構造, ソフトバンク社, (1992) pp.185-193
- [9]. 鑑聡: 各種 WWW サーバ・ソフトウェアをインストールする, Interface, 22, 6, CQ 出版社, (1996) pp.104-124
- [10]. 松田慎一: 最新 Java 事情〜 JDK1.2 の新機能, JAVA PRESS, 1, 技術評論社, (1998) pp.2-19
- [11]. 渡辺操, 小林亮, 畑中雅彦, 田島和典: Java によるデータベース利用の総合研究環境の構築について, 平成 9 年度室蘭工業大学開発技術研究会, pp.21-22 (1997)

カルコゲナイドガラス及び ファイバーの光透過性とCO₂レーザーパワー伝送性

稲川 郁夫^{*1}, 山下 俊晴^{*2}, 西井 準治^{*3}, 城谷 一民^{*1}

Optical Transmission Characteristics and Deliverable Capabilities for CO₂ Laser Power of Chalcogenide Glasses and Fibers

Ikuko INAGAWA, Toshiharu YAMASHITA, Junnji NISHII and Ichimin SHIROTANI

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

The thermal and optical properties of infrared transmitting chalcogenide glasses and the deliverable efficiency for CO₂ laser power of the glass fibers have been investigated. The laser deliverable capabilities of the fiber were dependent on the thermostability, the loss and the temperature dependence of the loss at 10.6 μm . The loss at 10.6 μm of the thermal stable Ge₂₀As₃₀Se₅₀ fiber was 5.3 dB/m; the loss of the fiber was insensitive to temperature and the fiber was durable up to 18.0 W (36.7 KW/cm²) of input power and then output power was 2.2 W (1.4 KW/cm²). The losses at 10.6 μm of the Te containing glass fibers such as GeAsSeTe and GeSeTe glass compositions were obtained about 2-3 dB/m. However the thermal stabilities of the Te containing glasses were somewhat lower than those of GeAsSe glasses. The lowest loss at 10.6 μm was obtained about 1 dB/m for Se₂₅Te₃₀I₄₅ fiber. The transmitted power of Se₂₅Te₃₀I₄₅ fiber was only 0.9 W (0.7 KW/cm²) and then input power was 2.9 W (5.9 KW/cm²). The thermal stability of SeTeI glass was significantly low. The loss at 10.6 μm of the Te containing glass fiber was very sensitive to temperature with increasing Te content. The most suitable composition of GeSeTe glass fiber against CO₂ laser power delivery was Ge_{32.5}Se_{22.5}Te₄₅ and the output power through the fiber was obtained 5.9 W (3.7 KW/cm²) and then the durability against incident power was achieved up to 24.8 W (50.5 KW/cm²).

Key words : Chalcogenide glass, Glass fiber, Transmission loss, CO₂ laser delivery

1. はじめに

CO₂レーザーパワー伝送用ファイバーには、結晶系ファイバーであるAgBr・IやKRS-5(TlI・Br)⁽¹⁾が検討されている。しかしながら、結晶材料はファイバー化が難しく、

光感光性のため黒化現象が生じたり、曲げの繰り返しにより微結晶化し、散乱損失が増加する等の欠点を有している。このため、ファイバーの母材としては紡糸性を含めフレキシビリティに富む安定なガラス質材料が望まれている。

長波長側まで光透過性を示すガラスとしては、カルコゲナイドガラスが知られている。カルコゲナイドガラスにはガラス化範囲が広く安定なガラス組成があり、透過波長に合わせガラス組成を選択すれば、CO₂レーザーパワー伝送用ファイバー母材として用いることができると考えられる。

カルコゲナイドガラス組成の中で、ガラス化範囲も広く安

*1 生産情報システム工学専攻

*2 HOYA(株)

*3 大阪工業技術研究所

定であるGeAsSe系には、加熱紡糸中でも損失増加の要因である結晶化が生じずらい組成範囲が存在する⁽²⁾。しかしながら、このガラス系にはCO₂レーザー波長である10.6 μm近傍に、ガラスの赤外透過性を限定する本質的吸収要因のGe-Se結合やAs-Se結合に基づくマルチフォノン(多音子)吸収が存在する。この吸収は、特に光路長の長いファイバーでは赤外光透過性を限定する主要な要因となる。したがって、赤外域でより低損失なガラスファイバー用の母材ガラスには、マルチフォノン吸収の要因であるフォノン吸収が、より長波長側に存在するガラス組成を検討する必要がある。単純な二原子結合を考えた場合、フォノン吸収の波長は結合に関与する原子の質量が大きいほど、また結合強度が弱いほど長波長側(低波数側)に生じる[$\nu = \frac{1}{2} \cdot (f/M_R)^{0.5}$, ν : 格子振動の振動数, f : 結合定数, M_R : 構成原子の換算質量, $\lambda = c/\nu$, λ : 格子振動の波長, c : 光速]。したがって、カルコゲン元素の中で質量の大きなTeを多く含有するカルコゲナイドガラス組成で、かつファイバー化に対して熱的に安定なガラスを見出すことにより、長波長側で低損失なファイバーを作成することができると考えられる。

ガラス化するTe系の組成としては、AsTe系、SiAsTe系、SiGeAsTe系及びGeAsTe系等が知られている^{(3)~(4)}。しかしながら、これらのカルコゲン元素としてTeのみを含有するガラス系では、結晶化に対して熱的に不安定で加熱紡糸中に容易に結晶化してしまう。また、10.6 μm近傍に現れる不純物(酸化物)ピークの主要原因となる酸素との反応性が高い原料であるSi等を含有している場合、いったん生じた酸素との結合が極めて強く安定であるため、ガラス中より酸素を除去できない等の欠点がある。また、Teとハロゲン元素を組成とするガラスであるTeI系、TeBr系やTeBrI系等⁽⁵⁾では、ガラス表面が大気中で徐々に結晶化し、光透過性に経時変化が生じるため、実用化には不適であると思われる。以上のことから、長波長帯の赤外透過性ファイバーに適するカルコゲナイドガラス組成は、単体でも容易にガラス化するガラス形成能力の高いSeをガラス形成主体として含有し、ファイバー化に対して安定である必要がある。

我々は、SeベースのGeAsSe系ガラスにTeを含有させたGeAsSeTe系ガラス⁽⁶⁾及びGeSeTe系ガラス⁽⁷⁾のファイバーで、10.6 μmでの損失値が1.5 dB/mのガラスファイバーが得られたことを報告した。また、さらに10.6 μm帯で低損失な新しいガラス組成系として、カルコハライドガラスに属するSeTeI系ガラスを調べ、10.6 μmでの損失値が0.9 dB/mのファイバーを作成することに成功した⁽⁸⁾。しかしながら、ガラスの物性とガラスファイバーを用いたCO₂レーザーパワー伝送特性との関連性に関する報告はほとんどない。

本研究では、先ずGeAsSe、GeAsSeTe、GeSeTe系ガラス及びSeTeI系ガラスファイバーの母材となるガラスの高純度化とファイバー作成方法を検討した。次に、ファイバーがCO₂レーザーパワー伝送中に吸収するパワーによる発熱のため熱損傷を受けることから、パワー伝送中のファイバー表面温度や温度に対する損失等の光学的特性の変化を調べ、パワー伝送特性と比較検討を行った。さらに、実用化実証に向けてハンドピースに組み込んだカルコゲナイドガラスファイバーを用いたCO₂レーザーパワー伝送実験を行った結果についても報告する。

2. 実験方法

2.1 ガラス高純度合成方法

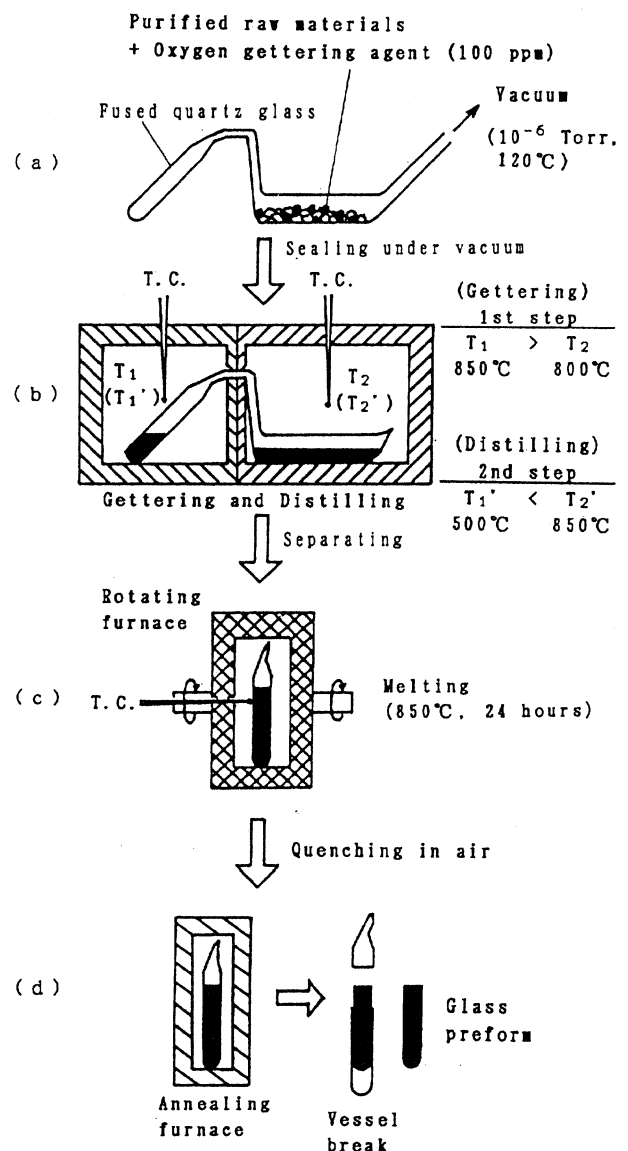


図1 ガラス蒸留精製・合成方法の概略

出発原料であるGe(10N), As(7N), Se(6N), Te(7N)及びI(6N)は、それぞれ下記の方法で精製してから合成に用いた。Geは精製水素ガス気流中、900℃で24時間還元処理を行った。Asは表面酸化物を取り除くために真空度 10^{-6} Torrで排気しながら、350℃で加熱処理を4時間行った。Se及びTeは炭素や酸化物を除去するために真空度 10^{-6} Torrで排気しながら、350℃及び550℃でそれぞれ蒸留精製を行った。Iは昇華精製を行った。ガラス合成及び原料精製に使用した石英ガラス容器は、弗酸洗浄・純水洗浄した後、真空排気しながらバーナーで加熱脱気し、室温まで冷却してから用いた。ガラス蒸留精製・合成方法の概略を図1に示した。ガラス合成容器は原料熔融部分と蒸留された精製原料を受ける部分の二つの部屋から成る。始めに、精製した原料をアルゴンガス置換真空グローブボックス中で所定組成比に秤量し、酸素ゲッター剤(Zr粉末、100ppm程度)とともに原料熔融部分に充填した(図1(a))。原料を充填したガラス容器の中に大気が入り込まないように真空引きアタッチメントに装着後、グローブボックスから取り出し、真空度 10^{-6} Torr台で12時間、120℃でベーキングしながら排気を行った。真空排気ベーキングの後、原料熔融部分と真空排気部分の間をバーナーで真空封止した。次に、真空封止したガラス合成容器を原料熔融部分と蒸留された原料を溜める部分を別々にプログラム制御加熱可能な電気炉にセットした(図1(b))。ここで、真空封止ガラス容器中で原料の蒸留を行う前に、原料熔融部分で酸素ゲッター処理を行う。ゲッター処理中は処理前に原料の蒸留が始まらないように、蒸留原料が溜まる部分をゲッター処理温度(800℃)よりも高温の850℃まで、2時間で升温し保持した。一方、原料熔融側は6時間かけ、徐々に800℃まで加熱した。酸素ゲッター処理は、800℃で6時間以上行った(図1(b)の1st step)。原料の蒸留精製は、酸素ゲッター処理後に原料熔融部分を850℃まで6時間かけゆっくりと升温し、逆に原料蒸留溜側は、ガラスが途中でつまらないように、ガラスの融点以上の温度である500℃までゆっくり下げた。蒸留は組成のずれが無いように、原料が全て蒸留されるまで行った(図1(b)の2nd step)。ガラス合成は、蒸留完了後、蒸留部分と熔融部分の間をバーナーで封止切り、蒸留原料が入った封止アンプルを回転電気炉に入れ24時間、850℃で回転攪拌溶融合成させることにより行った(図1(c))。原料融液のガラス化は、合成アンプルを電気炉より取り出し、室温まで急冷し行った。さらに、ガラス中の歪を取り除くため、ガラス転移点温度+10℃で1時間保持後、12時間かけて室温までゆっくりと除冷アニールした(図1(d))。アニール後、合成容器からガラスを取り出し、必要に応じて切断、研磨を行った。ガラス化は、X線回折実験によるハローパターンの観察や熱分析によるガラス

転移点の測定により判定した。以上で述べた合成方法により、直径10~20mm、長さ50~100mm程度のガラスロッドの作成が可能であった。

2.2 熱物性測定方法

ガラス転移点温度や結晶化ピーク温度等は、示差走査熱分析装置(DSC:理学電機製)により計測したDSC曲線より求めた。測定試料は乾燥させた100から200メッシュの粉体をアルミ容器に充填後、シールし用いた。測定は窒素ガス気流中(100cc/min)、升温速度10℃/minで行った。熱膨張係数の測定には熱力学測定装置(TMA:理学電機製)を用いた。測定試料は4mm ϕ ×20mmに研磨加工した。測定は、窒素ガス気流中(100cc/min)、升温速度4℃/minで行った。

2.3 光物性(透過率・屈折率)測定方法

短波長側の透過率及び反射率測定にはダブルビーム自己分光光度計(日立製)を用い、長波長側の測定にはダブルビーム赤外分光光度計(日立製)を用いた。透過率測定用の試料には、両面をアルミナ研磨剤で平行鏡面研磨したものを用いた。反射率の測定には、試料の片面のみを鏡面研磨した試料を用いた。高吸収波長領域での光吸収係数(α (cm $^{-1}$))は、次の関係式から計算した⁽⁹⁾。

$$\alpha = d^{-1} \cdot \ln \{ [(1-R)^2 + [(1-R)^4 + 4R^2 T^2]^{1/2}] / 2T \}$$

ここで、Tは透過率、Rは反射率、d(cm)は試料の厚みである。屈折率測定はスペクトルメーター法⁽¹⁰⁾で行った。試料はプリズム形状に鏡面研磨加工したガラスを用いた。透過率や屈折率の温度依存性は、試料をアルゴンガス雰囲気中で加熱保持しながら測定した。

2.4 ファイバー作成方法

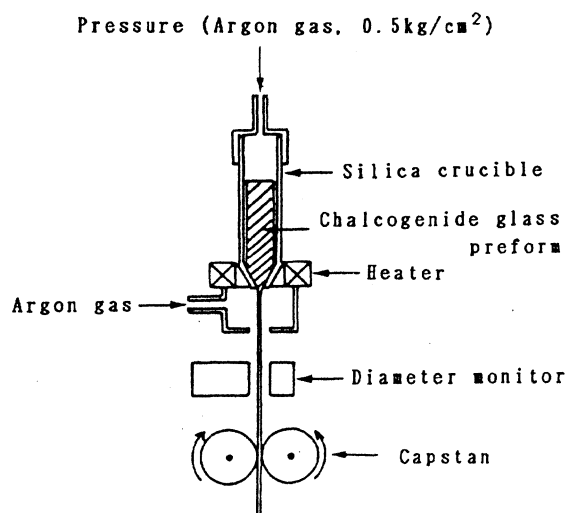


図2 ファイバー紡糸装置の概略

アンクラッドガラスファイバー紡糸装置の概略を図2に示す。ガラスファイバーはガラスロッドを底がノズルになっている石英ガラスルツボに入れ、圧力0.5kg/cm²の窒素ガスを流しながら加熱を行い、軟化し、ノズルより出でたガラスを巻き取る、加圧ルツボ紡糸法で作成した。ファイバーの線径はレーザ線径測定器を用い、巻き取りローラーの回転速度をコントロールすることにより制御した。作成したファイバー径は400~450μmである。テフロン樹脂クラッドガラスファイバーは鏡面研磨したガラスロッドに熱収縮テフロンを予めジャケットした後、プリフォームを局所部分加熱可能な電気炉に送り込みながら紡糸する、ロッド法で作成した。また、ガラスクラッドファイバーは鏡面研磨したコアガラスロッドと、同じく内面が鏡面のクラッドガラスチューブを作成し、チューブにロッドを装填した後、ロッドとチューブの隙間を真空排気しながら、ロッドインチューブ法で作成した。ファイバーは紫外線硬化樹脂をオンラインで塗布し、硬化させることにより表面保護した。

2.5 ファイバー損失測定方法

図3に損失測定装置の概略を示した。損失測定は長さの異なる長・短ファイバーの光透過光量の比から計算するカットバック法で行った。損失の計算式を次に示す。

$$\text{Loss (dB/m)} = -10 \cdot \text{Log} (P_{\text{long}} / P_{\text{short}}) / (L_{\text{long}} - L_{\text{short}}),$$

ここで、 P_{long} と P_{short} は長い(L_{long} [m])ファイバーと短い(L_{short} [m])ファイバーを透過した光パワーをそれぞれ示している。損失測定には、長・短ファイバーの長さの差が1m以上のものを用いた。損失の温度依存性は、長・短ファイバーをそれぞれ所定の温度に加熱保持しながら測定した、透過光量の比より求めた。

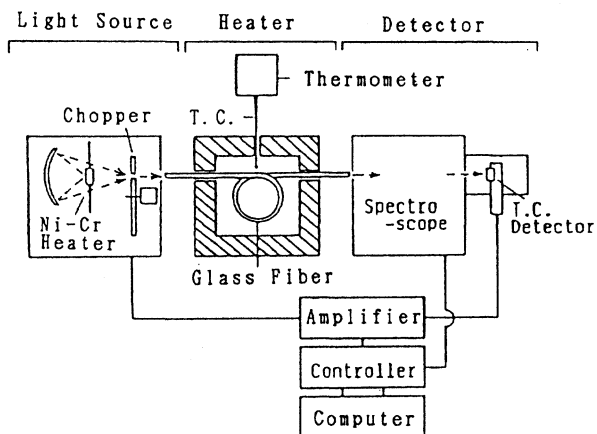


図3 損失測定装置の概略

2.6 CO₂レーザーパワー伝送特性測定方法

伝送実験系の概略を図4に示す。用いたCO₂レーザー

(NC-1100:日本赤外線工業社製)はランダム偏光(TE_{M00})のCWレーザーで、出力は100Wである。パワー測定にはパワーメーター203(コヒーレント社製)を用いた。レーザー光はZnSeレンズ($f=30\text{mm}$)でビーム径250μmに集光し、長さ1mの両端面鏡面研磨ファイバーの入射端面に全て入射した。入射パワーはビームスプリッター(1:9分割)からの分離パワーを基に校正し、出射パワーは直接パワーメーターで測定した。パワー伝送中はファイバー端面にゴミや塵などが付着しないよう窒素ガス(500cc/min)を吹き付けながら行った。

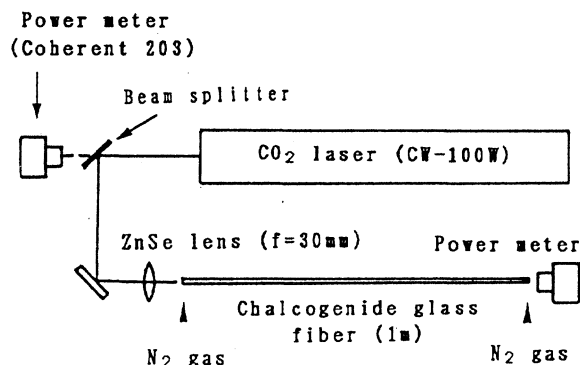


図4 CO₂レーザーパワー伝送実験系の概略

3. 実験結果及び議論

3.1 バルクガラス測定実験結果

3.1.1 ガラスの諸物性 代表的な長波長帯透過性ガラスのGeAsSe系, GeAsSeTe系, GeSeTe系, 及びSeTeI系ガラスの諸物性を表1に示した。また、図5にはガラス化範囲をまとめて示した^{(6)-(8),(11)}。組成の単位はatomic %である。ガラス化範囲は概ねSe組成リッチ側に存在する。ガラスの基本的特性温度であるガラス転移点温度(T_g)は、特にSeTeI系ガラスが低い値を示している。これはガラス結合が4配位のGeや3配位のAs等をガラス成分として含まないため、カルコゲン元素(2配位)間の共有結合に基づく、1次元の鎖あるいは環状構造が弱いファンデルワールス力で結合しており、しかも、1配位であるハロゲン元素(I)が結合を切断する終端として働いているためと推測される。また、カルコゲナイドガラスの熱膨張係数(η)は、一般的な酸化物ガラスであるBK7($T_g=565^\circ\text{C}$, $\eta=63 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$)に比べて1桁程度大きく、 T_g は150°C以上低い。屈折率(n)は測定波長の違いはあるが、BK7が1.52(587.2nm)であるのに比べ、カルコゲナイドガラスは2.5~3程度と高い屈折率を示している。すなわち、反射率 $R \approx (n-1)^2 / (n+1)^2$ が大きいことから、レーザーパワー伝送の際には表面反射も大きいと考えられる。屈折率の温度依存性(dn/dT)は、Teを多く含有するものが大きい値を示す傾

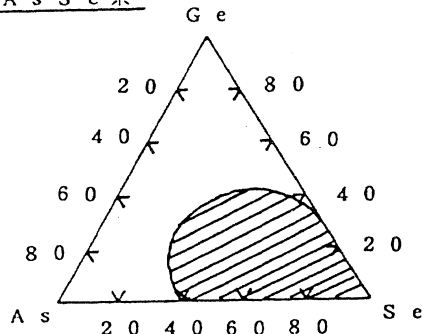
表1 種々カルコゲナイドガラスの熱的, 光学的諸物性

Composition (atomic%)	DSC 10°C/min T _g (°C)	TMA 4°C/min η (10 ⁻⁷ /deg)	Refractive index n	dn/dT (10 ⁻⁵ /deg)	Band gap ($\alpha=10^3\text{cm}^{-1}$) E _g (eV)	dE _g /dT (10 ⁻⁴ /deg)
Ge ₂₀ As ₃₀ Se ₅₀	290	164	2.58	3	1.87	8.5
Ge ₂₀ As ₃₀ Se ₃₀ Te ₂₀	236	152	2.85	4	1.36	7.0
Ge ₂₀ As ₁₅ Se ₂₅ Te ₄₀	219	160	2.87	10	1.16	7.6
Ge _{22.5} Se _{22.5} Te ₄₅	244	162	2.90	8	1.30	7.0
Ge ₂₀ Se ₁₀ Te _{51.5}	216	170	2.97	14	1.15	-
Se ₂₅ Te _{50.15}	48	627	2.92	14	1.18	33.3

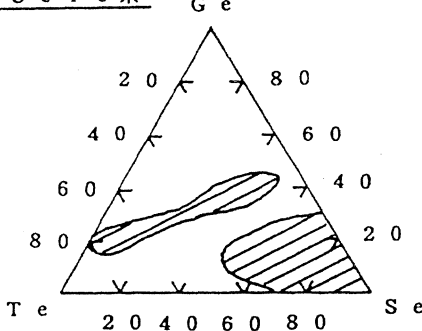
向にある。また, 光路長の温度係数は $ds/dT=(n-1)\eta+dn/dT$ で表されることから, n , η 及び dn/dT の大きいカルコゲナイドガラスでは, 熱により光路長が大きく変化し, 光学レンズ等に応用する場合, 波面歪を生じるなどの問題を生むものと考えられる。

(a t o m i c %)

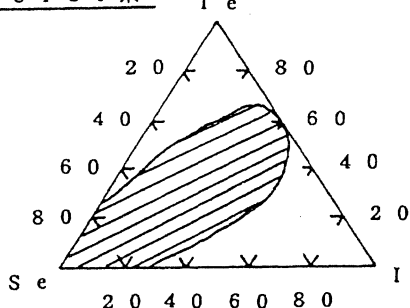
GeAsSe系



GeSeTe系



SeTeI系



GeAsSeTe系

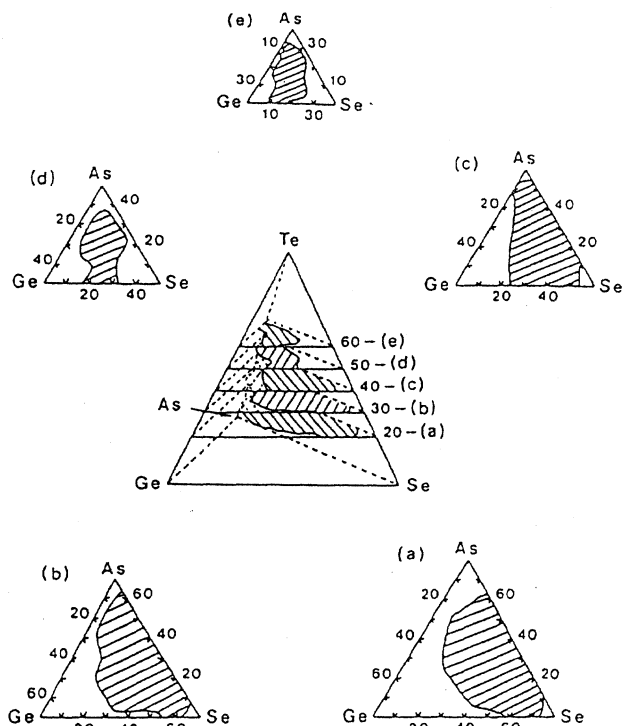


図5 GeAsSe系, GeSeTe系, SeTeI系ガラス及びGeAsSeTe系ガラスのガラス化範囲

3.1.2 ガラスの光透過率 図6には短波長側の透過スペクトルを比較のためS系ガラスも含めて示した。短波長側の吸収端は, S系→Se系→Te系ガラスの順に長波長側に, すなわち, 低エネルギー側にシフトしている。このため, Se系ではもはや可視光は透過しない。また, 屈折率もS系→Se系→Te系ガラスの順に大きくなることから, 同順序で反射率が高くなり, 透過率が一定になる波長帯での透過率は全体的に低下している。図7には代表的なガラスの板状及びロッド状ガラスの写真を示した。GeS系ガラス(a)は透明黄色, GeAsS系ガラス(b)は透明オレンジ色, AsS系ガラス(c)は透明赤色, Ge, As, Se及びTeから成るガラ

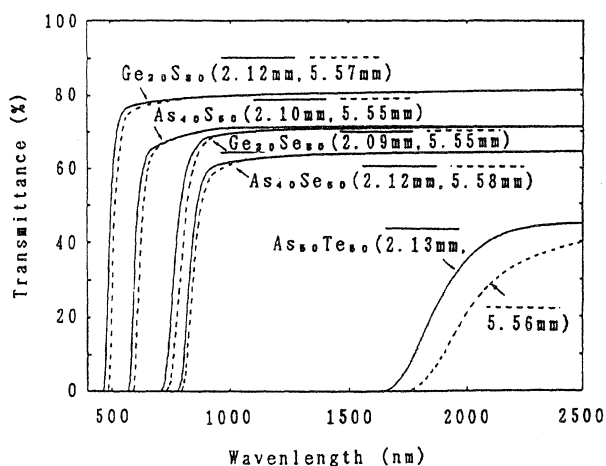


図6 種々カルコゲナイドガラスの短波長側における透過スペクトル

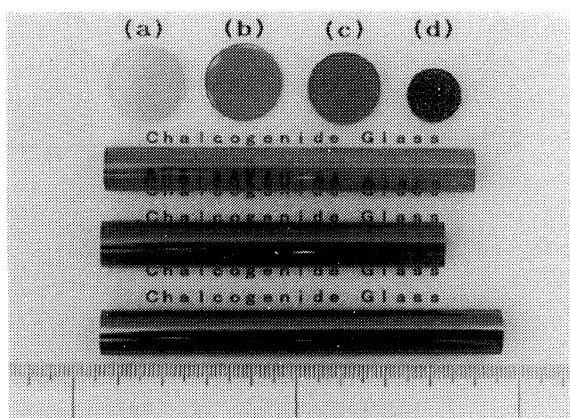


図7 種々カルコゲナイドガラス

- (a) 黄色 ($\text{Ge}_{20}\text{S}_{80}$)
- (b) オレンジ色 ($\text{Ge}_{10}\text{As}_{30}\text{S}_{60}$)
- (c) 赤色 ($\text{As}_{40}\text{S}_{60}$)
- (d) 黒色金属光沢 ($\text{Ge}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{20}$)

ス(d)では可視光をまったく透過しない黒色の金属光沢を示すガラスになる。この結果はガラスの光学的バンドギャップ(Eg) [短波長側での吸収係数が 10^3cm^{-1} を示す外挿点におけるエネルギー値より求めた]が、S系 \rightarrow Se系 \rightarrow Te系ガラスの順に小さくなることに起因する。

図8には長波長側の透過スペクトルを示した。長波長側透過限界は、大まかに重元素含有量が多いものほど長波長側にシフトしている。

図9にはTe含有系カルコゲナイドガラスである $\text{Ge}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{20}$ の赤外透過スペクトルを示した。未精製ガラスでは不純物による吸収ピークが観測されている(図9の(a))。カルコゲナイドガラスで観測される不純物吸収は、主として

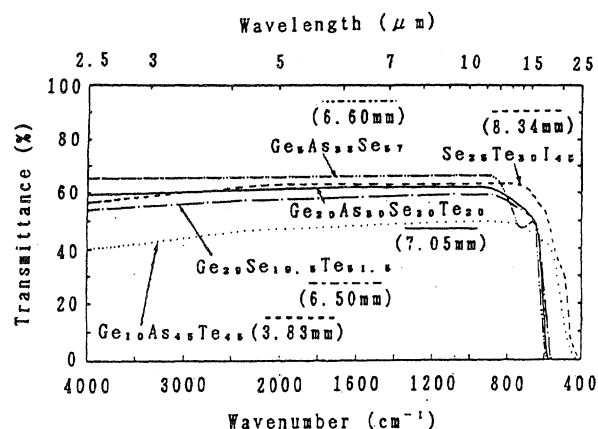


図8 種々カルコゲナイドガラスの赤外透過スペクトル

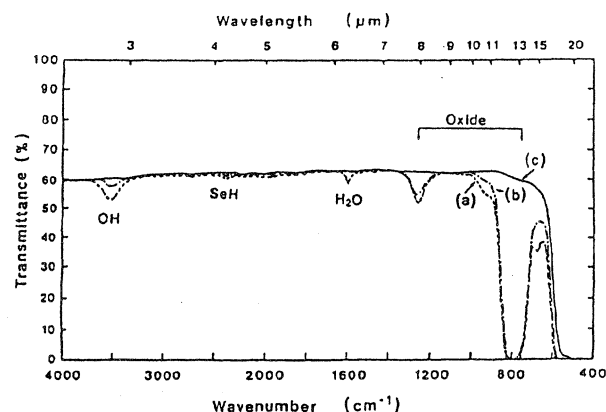


図9 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{20}$ ガラスの赤外透過スペクトルと精製処理効果(ガラス厚:8mm)

- (a) 未精製
- (b) 真空封止中で蒸留
- (c) 酸素ゲッター処理後、真空封止で蒸留

原料から持ち込まれる酸素あるいは水分に起因する。これら不純物はガラスを精製処理することにより除去可能であった。様々な精製処理を検討した結果から、精製処理方法としては図9の(c)スペクトルに示したごとく、Zrを用いた酸素ゲッター処理が不純物除去に有効であることを見出した。精製したガラスの赤外透過スペクトルには、長波長側の $13\mu\text{m}$ 近傍に不純物吸収ピークに隠れていた、本質的吸収であるマルチフォノン吸収が小さいながら観測されている。

精製したガラスを用いて、長波長側のフォノン吸収領域での吸収係数と波数の関係調べた結果を図10に示す。 943.4cm^{-1} ($10.6\mu\text{m}$)近傍には、Ge-Se結合(基準振動; 234cm^{-1})及びAs-Se結合(245cm^{-1})の4倍音が存在する。また、Ge-Te結合(196cm^{-1})及びAs-Te結合(200cm^{-1})に基づくマルチフォノン吸収では、倍音数の大きい5倍音が影響すると考えられる⁽¹²⁾。マルチフォノン吸収領域にあたる波長 $10.6\mu\text{m}$ の吸収係数を低くするためには、影響を及ぼすフォノン吸収の倍音数が大きい方が、吸

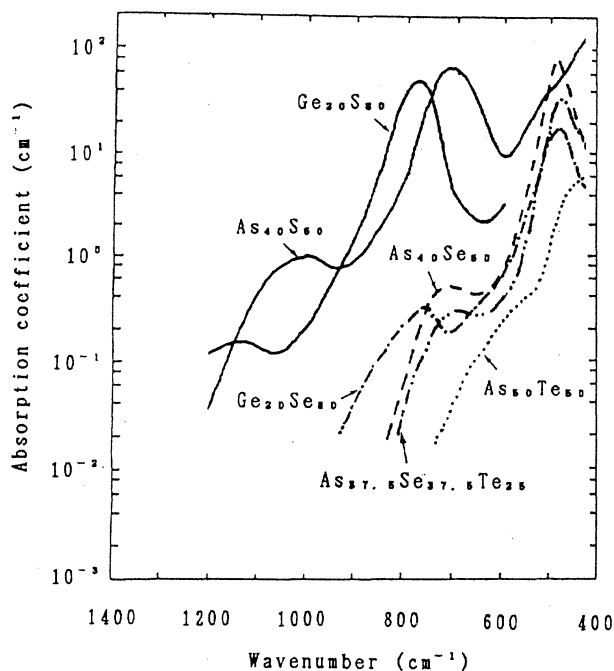


図10 カルコゲナイドガラスにおける
マルチフォノン吸収領域の吸収係数

収が小さいため有利であると思われる。図10の10.6 μm (943.4 cm^{-1})での外挿損失値は、 $\text{As}_{50}\text{Te}_{50}$ ガラスで0.1 dB/m 、 $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$ ガラスで2 dB/m 程度となる。また、 AsSeTe 系ガラスは、組成にもよるが中間的な吸収係数を示している。したがって、本質的な長波長側透過波長を限定するマルチフォノン吸収から低損失化を考えた場合、 Te を多く含有するガラス組成が有望である。

以上のバルクガラス評価結果から、CO₂レーザーパワー伝送用ガラスとしては、 Te 含有系のガラスで、ガラスの安定性を示すガラス化範囲の広さ、及び熱的な安定性を示すガラス転移点や長波長側での光透過性等を含めて考慮する必要がある。また、 Te 含有系ガラスは、他の S 系や Se 系に比べてバンドギャップが小さい。半導体特性を示すカルコゲナイドガラスでは、熱に伴う吸収増加などが観測されることから⁽¹⁴⁾、バンドギャップはなるべく大きい組成が好ましいと思われる。また、屈折率は光の表面反射ロス等の観点から小さいものが好ましいと考えられるが、反射防止膜を形成することにより改善することが可能である⁽¹³⁾。

3.2 ファイバー評価測定結果

3.2.1 精製と損失特性の関係 図11には GeAsSe ガラスファイバーを例とした精製方法と光透過損失特性スペクトルの関係を示した。精製バルクガラス(図8及び9)では観測されないが、低レベルの不純物吸収が光路長の

長いファイバーでは詳細に観測される。スペクトル中の2.9 μm の吸収ピークは、 Se-OH 結合の振動に基づく吸収、4.6 μm は Se-H 結合に基づく吸収、6.3 μm は H_2O 分子に基づく吸収、また7.9 μm は Ge-O 結合に基づく吸収である。

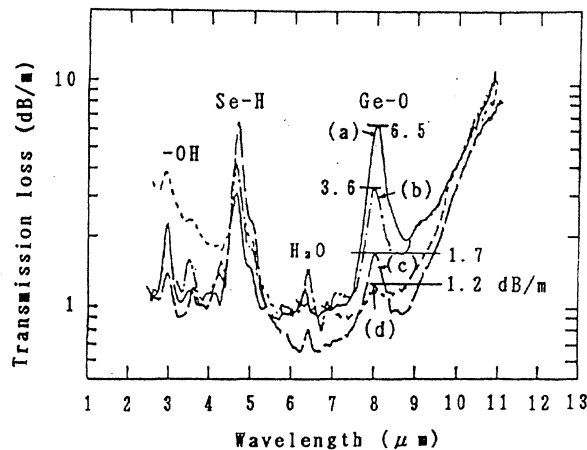


図11 $\text{Ge}_{10}\text{As}_{38}\text{Se}_{52}$ ガラスファイバーの光透過損失
スペクトルと精製効果

Ge ; 水素還元精製

- (a) As (未精製) + Se (真空排気下蒸留)
- (b) As (加熱排気) + Se (真空排気下蒸留)
- (c) As , Se (真空排気下蒸留)
- (d) As , Se (酸素ゲッター + 真空封止蒸留)

精製処理により Se-H の吸収損失値は7 dB/m から3 dB/m に減少し、 Ge-O の吸収損失は6.5 dB/m から1.2 dB/m まで減少する。しかしながら、図11の(d)の光透過損失スペクトルには、種々の精製処理では除去しきれない不純物残渣として、水素が関与する $-\text{OH}$ 結合と $-\text{H}$ 結合に起因する吸収が大きく観測されている。この吸収ピークは、原料中に残存していた H_2O 分子等から酸素ゲッター作用により酸素が取り除かれ、残った H あるいは OH 基が原料と結合することによるものと考えられる。 H あるいは OH を除去する効果的な方法として、塩素雰囲気中で原料あるいはガラスを加熱処理後、蒸留脱塩することを検討した。しかしながら、若干の精製効果はあるもののガラス中に塩素が取り込まれる結果、ガラスネットワーク結合を分断する終端結合が多くなり、塩素処理ガラスファイバーは機械的強度が弱く容易に破断するようになった。したがって、ファイバー作成用の母材ガラスには、真空蒸留とゲッター処理精製を行ったガラスが、今のところ最も好ましいと思われる。

3.2.2 ガラスファイバーの損失特性 ガラス組成の異なるカルコゲナイドガラスファイバーの光透過損失スペクトルを図12にまとめて示した。

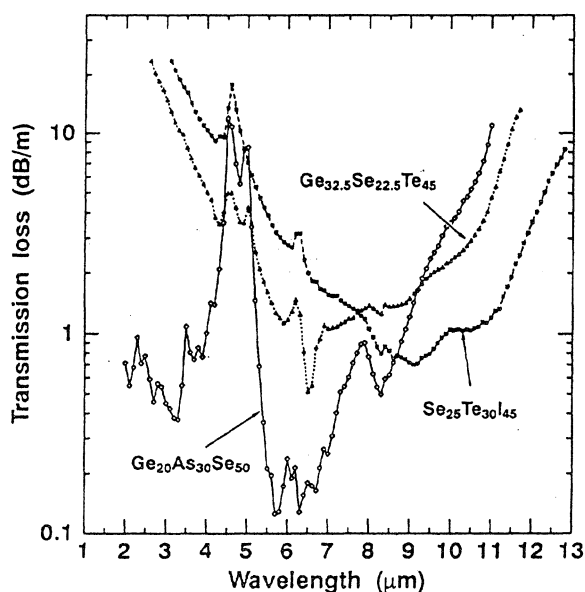


図12 組成の異なるカルコゲナイドガラスファイバーの光透過損失スペクトル

Se系ガラスの $\text{Ge}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{50}$ ファイバーでは、およそ5～10 μm , Te含有系ガラスの $\text{Ge}_{32.5}\text{Se}_{22.5}\text{Te}_{45}$ ファイバーでは5.5～11 μm , カルコハライドガラス系の $\text{Se}_{25}\text{Te}_{30}\text{I}_{45}$ ファイバーでは6.5～12 μm に、光学的ファイバー赤外透過領域がある。長波長側の10.6 μm での損失を見る限りでは、TeやI等の原子量の大きな元素を多く含むガラスファイバーほど低損失になる傾向にある。しかしながら、短波長側の損失と最低損失波長帯の損失レベルは、Te等の含有量が多くなると増加している。これは散乱吸収のレベルが増加することに基づくものと推測される。

図13には10.6 μm での損失値とTe含有量の関係を、Ge, As, Se, Te元素の組み合わせから成るガラス組成系の中からガラスファイバーを作成し、評価した結果である。この結果から、Teを含有するガラスの10.6 μm での損失値は、含有量50atomic%近傍まで減少する。しかしながら、Te含有量が50atomic%を越えると、散乱吸収レベルの増加が大きくなり、逆に損失が高くなる。したがって、10.6 μm で低損失なガラスの最適なTe含有量は50atomic%程度であると考えられる。

3.3 CO₂レーザーパワー伝送

3.3.1 レーザーパワー伝送特性とガラス組成 代表的なカルコゲナイドガラスファイバーを用いたCO₂レーザ

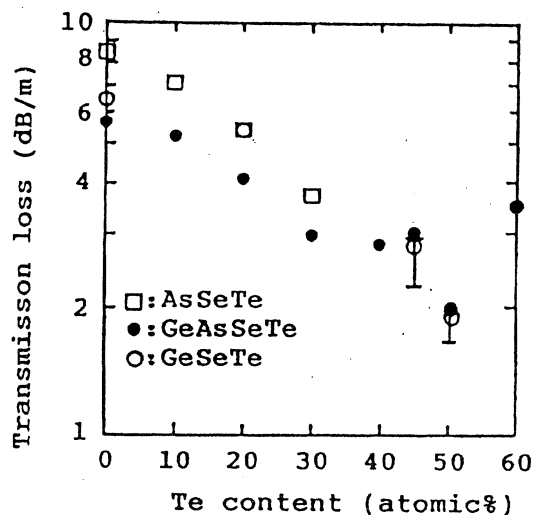


図13 Te含有ガラスファイバーの10.6 μm における損失値とTe含有量の関係

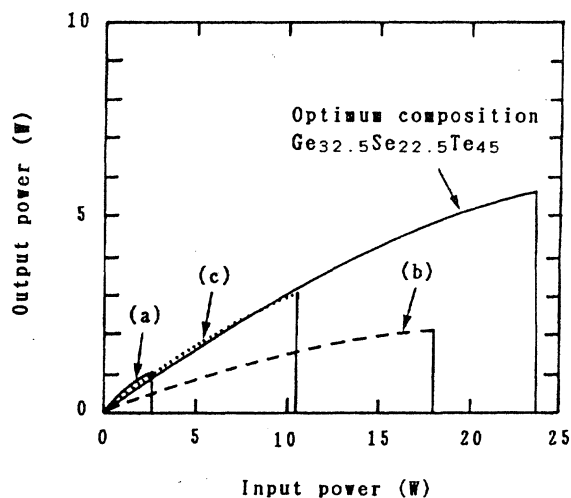


図14 CO₂レーザーパワー伝送特性
(a) $\text{Se}_{25}\text{Te}_{30}\text{I}_{45}$
(b) $\text{Ge}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{50}$
(c) $\text{Ge}_{29}\text{Se}_{19.5}\text{Te}_{51.5}$

ーパワー伝送特性を図14に示した。10.6 μm で最も低損失なガラスである $\text{Se}_{25}\text{Te}_{30}\text{I}_{45}$ ガラスファイバーは^(a), ガラス転移点温度が48℃で熱的安定性が低いため、低入射パワーでファイバーが熱損傷を受けてしまう(図14の(a))。SeTeI系ガラスファイバーに比べ熱的安定性が高い。すなわち、ガラス転移点が290℃と高い $\text{Ge}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{50}$ ガラスファイバーでは、損失値が高いため、ファイバーを透過してくるパワー伝送効率($P_{\text{in}}/P_{\text{out}}$)は小さい。しかしながら、入射レーザーパワーに対して、出射パワーが頭打ちになりながらも、高い耐久性を示している(図14の(b))。損失値及び熱的安定性が中間的な $\text{Ge}_{29}\text{Se}_{19.5}\text{Te}_{51.5}$ ガラスファイバーで

は、伝送効率や入射パワー耐久性も中間的な特性を示している(図14の(c))。したがって、伝送特性は伝送効率に影響を及ぼす損失と、耐入射パワー特性に影響を及ぼすガラスの熱的安定性のバランスが大きく効いていると考えられる。

3. 3. 2 レーザーパワー伝送中のファイバー表面温度

CO₂レーザーパワー伝送中に、ファイバーが熱損傷を受けることから、入射パワー耐久性の高いGe₂₀As₃₀Se₅₀ガラスファイバー(8.8 dB/m at 10.6 μm)と、伝送効率の高いGe₂₅Se_{19.5}Te_{51.5}ガラスファイバー(2.4 dB/m)及び、10.6 μmでの損失値が中間的なGe₂₅As₂₅Se₄₀Te₁₀ガラスファイバー(5.7 dB/m)を用い、8WのCO₂レーザーパワーを連続入射しながら、ファイバー表面温度を測定した結果を図15に示した。

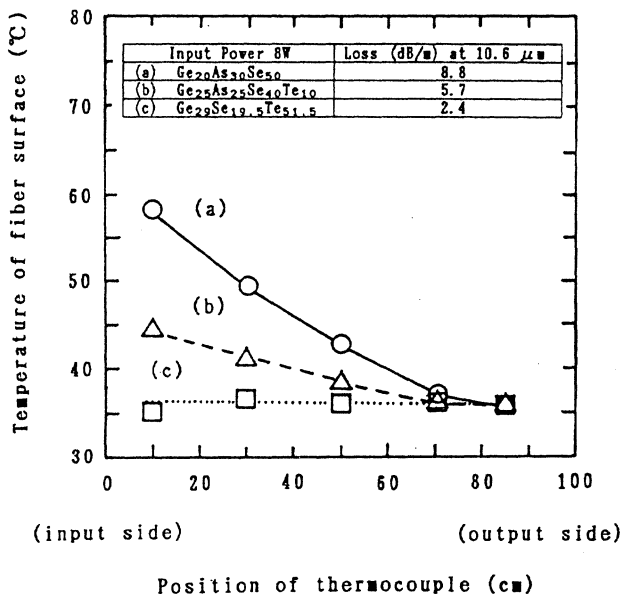


図15 CO₂レーザーパワー8W連続入射時のファイバー表面温度と温度測定位置の関係

伝送中にファイバーで吸収されるパワーによって生じる発熱に伴う温度上昇は、損失値の高いファイバーほど入射端側で大きい(図15の(a))。また、損失の低いファイバーでは、温度の上昇が位置によらず全体的に低い(図15の(c))。

図16には入射レーザーパワーと入射端側のファイバー表面温度の関係を示した。入射パワーに対する温度上昇の度合いは、損失値の低いファイバーでは小さく観測される(図16の(c))、損失の高いファイバーでは大きく観測される(図16の(a))。しかしながら、図14に示したCO₂レーザーパワー伝送実験では、Teを含有しないガラスに比べて、損失が低いTe高含有組成のガラスファイバーの方が、低

い入射パワーで、しかも頭打ち状態になることなく、急に熱損傷(熔断)を受けている。これは、レーザーパワー伝送中の少ない温度上昇でも、損傷を誘発する要因が、10.6 μmで低損失なTe含有ファイバーに存在することを示唆している。

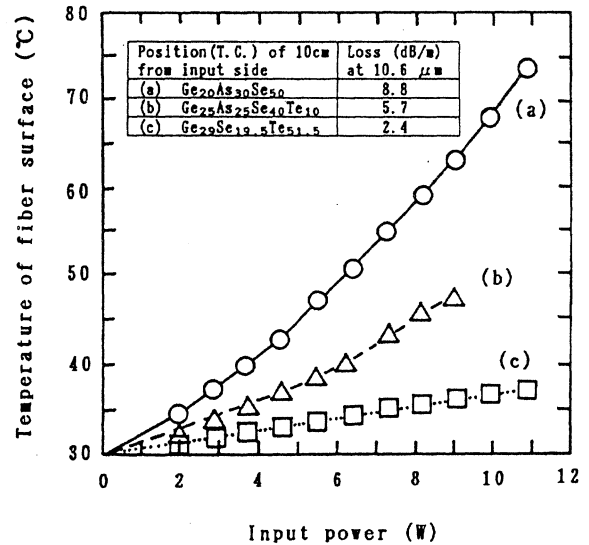


図16 CO₂レーザー入射パワーと入射端から10cmの位置におけるファイバー表面温度の関係

3. 3. 3 損失の温度依存性 As₄₀Se_{60-x}TeX組成でXが0と30atomic%のガラスファイバーの損失特性の温度依存性をファイバー透過波長範囲で調べた結果を図17と図18に示す。

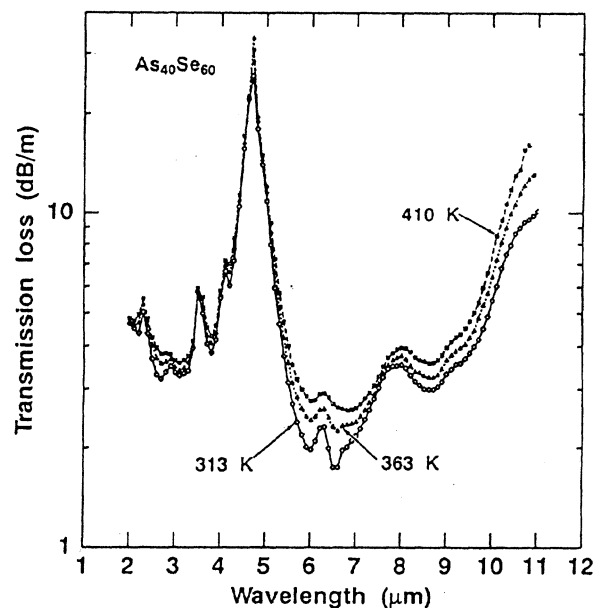


図17 As₄₀Se₆₀ファイバーの光透過損失スペクトル

図17に示したTeを含有していない組成に比べ、図18に示したTe含有系ファイバーでは、比較的低温でも広い波長範囲にわたり、損失が大きく増加する特徴を示している。

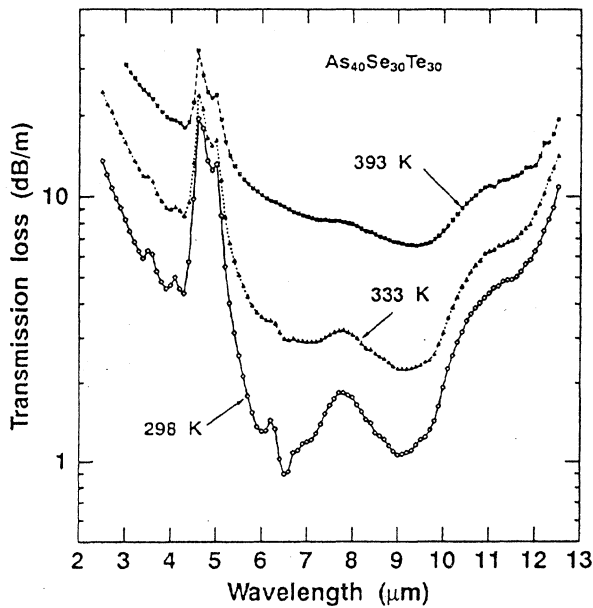


図18 $\text{As}_{40}\text{Se}_{30}\text{Te}_{30}$ ファイバーの光透過損失スペクトル

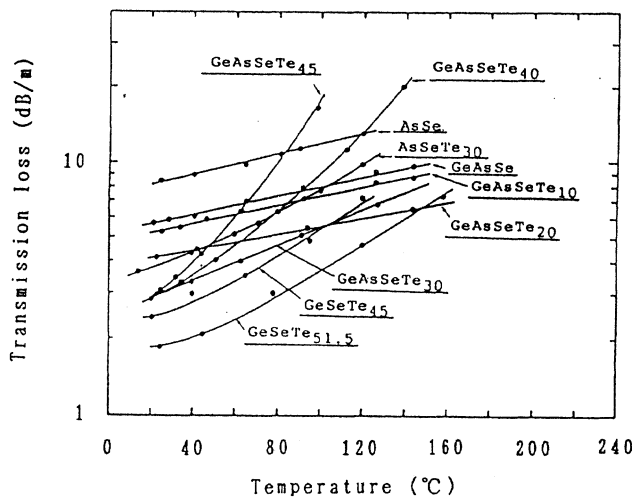


図19 種々カルコゲナイドガラスファイバーの
10.6 μm における損失値の温度依存性

また、図19にはいろいろなファイバーの10.6 μm における損失の温度依存性をまとめて示した。温度に対する損失の増加は、ほぼ指数関数的に増大している。ここで、ガラスファイバーを用い測定した10.6 μm における光吸収係数(α (cm⁻¹))の温度依存性から、 $\ln \alpha$ と $1/T$ が直線関係にある温度範囲で、 $\alpha = \alpha_0 \exp(-E/k_B T)$ の式により求めた、エネルギー係数(E)とTe含有量の関係を図20に

示した。ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である。

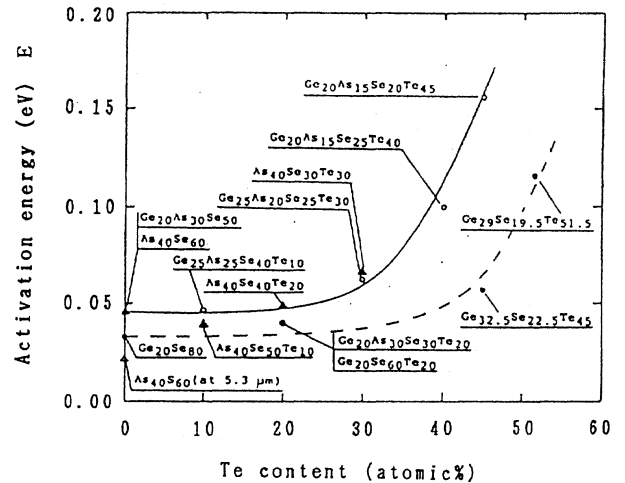


図20 種々カルコゲナイドガラスファイバーの
Te含有量と10.6 μm における損失値
の温度依存性から求めたエネルギー係数
 E ; $\alpha = \alpha_0 \exp(-E/k_B T)$

図20の実線で示した、ガラス組成中にAsを含有するGeAsSeTe系ガラスでは、Te含有量として約30atomic%以上になると損失の温度依存性が大きくなり、Asを含まないGeSeTe系ガラスでは、およそ45atomic%まで損失の温度依存性が小さいことが判る(図20の破線)。また、損失増加の大きさはTe含有量が多い、すなわちバンドギャップが小さいガラスほど大きくなっている。これは結晶半導体で観測される、熱によって励起され指数関数的に増加する、フリーキャリア吸収に似た吸収が、非晶質であるカルコゲナイドガラス半導体でも、光路長が長いファイバーでは観測され、損失増加の要因になることを示しているものと思われる⁽¹⁴⁾。

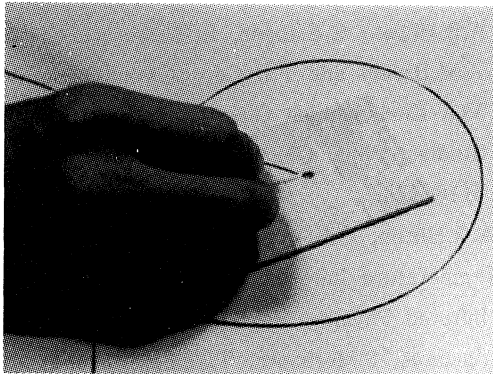
CO_2 レーザーパワー伝送用ガラスファイバー用のガラス組成として、損失値、熱的安定性、パワー伝送特性及び損失の温度依存性などを総合的に検討し、最適化した結果、GeSeTe系のガラス組成で、Te含有量として45atomic%を含む $\text{Ge}_{32.5}\text{Se}_{22.5}\text{Te}_{45}$ 組成のガラスファイバーで、最大出力パワーが5.9W(入射パワー24.8W、ファイバーコア径450 μm 、長さ1m)を達成することができた(図14)。代表的なガラスの諸特性と CO_2 レーザーパワー伝送特性は表2にまとめて示した。また、実用化に当たってはコア・クラッド構造のファイバーが必要になるが、GeSeTe系ガラスよりも屈折率や熱物性の選択性に富み、損失値が比較的 low、しかも結晶化に対して熱的に安定で、ガラス化範囲の広いGeAsSeTe系ガラス(図5)が、クラッドガラスとして有望なガラス組成系であると考えられる。

表2 ガラスの諸物性とCO₂レーザーパワー伝送特性

Composition (atomic %)	Se _{2.5} Te _{3.0} I _{4.5}	Ge _{2.0} As _{2.0} Se _{6.0}	Ge _{2.0} Se _{1.0} Te _{1.1}	Ge _{2.2} Se _{2.2} Te _{4.6}
Loss (dB/m) at 10.6 μ m	0.9	5.3	1.8	2.1
Temperature dependence of loss at 10.6 μ m E _r (eV)	0.880	0.048	0.117	0.058
Input power (W)	2.9	18.0	10.6	24.8
Power density (kW/cm ²) of input power	5.9	36.7	21.6	50.5
Output power (W)	0.9	2.2	3.1	5.9
Power density (kW/cm ²) of output power	0.7	1.4	1.9	3.7

Fiber length : 1 m, Diameter : 450 μ m4. CO₂レーザーパワーのファイバー伝送実験

図21にはファイバー出射レーザーパワー2Wで木板に照射した状態を示した。

図21 CO₂レーザーパワー伝送実験

木板片はレーザー照射と同時に赤熱し煙を上げ炭化している。伝送に用いたファイバーは、ガラスコア・クラッド構造で表面をUV硬化樹脂で保護したものであり、伝送中に直接、素手でハンドリングしても何等支障が無い。さらに図22には、レーザーパワー伝送中に吸収されるパワーによる発熱を抑えるため、ガス冷却機構を備えた集光レンズ付きのハンドピースにファイバーを装着し、集光したレーザー光（ファイバー端面より連続3W出射）を木片やレモンに照射した実験を示したものである。CO₂レーザーは水分に対する吸収が極めて良いことから、効率良く照射面で吸収され、レーザが照射されているスポット部分が赤くなり、表面が黒く炭化している。

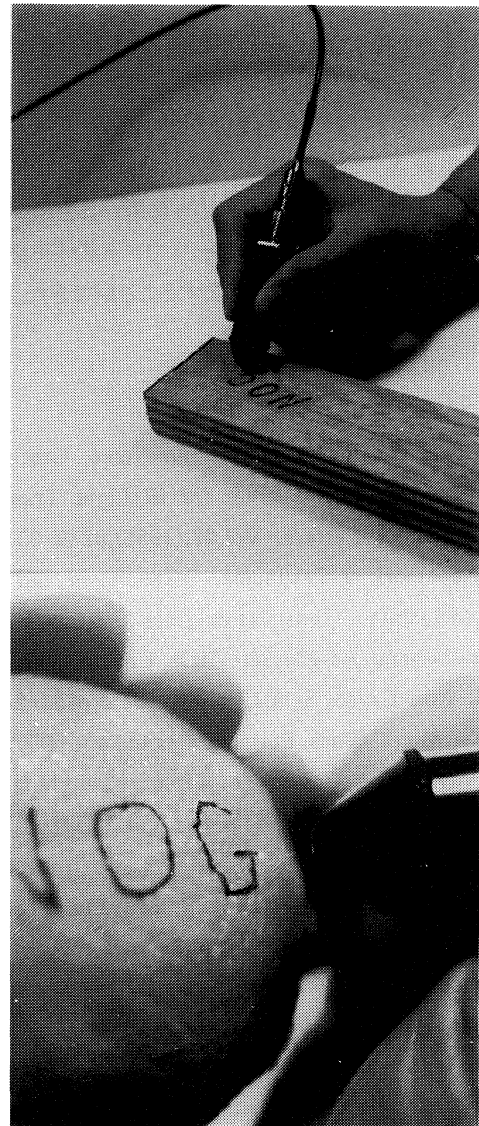


図22 ガス冷却機構・集光レンズ付きハンドピースを用いたファイバーによるCO₂レーザーパワー伝送実験

5. まとめ

カルコゲナイドガラス及びガラスファイバーの熱的・光学的物性とCO₂レーザーパワー伝送特性を検討し、以下のことが判った。波長10.6 μ mのレーザーを伝送するガラスファイバーでは、ガラスの熱的安定性と損失及び損失の温度依存性のバランスが、レーザーパワー伝送性能を決定している。伝送効率は損失値に依存する。損失値を低減化するためには、ガラス組成成分に原子量大きなTeを多く含有させることが有効である。しかしながら、Te含有量の増加とともに10.6 μ mでの損失の温度依存性は、指数関数的に急激に増加する。このため、高Te含有カルコゲナイドファイバーでは、レーザーパワー伝送中にファイバー中で発生する熱が引き金となり、ある限界を越えると、急に熱損傷を受ける。

カルコゲナイドガラスを用いたCO₂レーザーパワー伝送の有力最適ガラス組成として、Ge_{32.5}Se_{22.5}Te₄₅を見出した。この最適ガラスファイバーを用いることにより、入射パワー24.8W(50.5kW/cm²)でファイバー出射パワー5.9W(3.7kW/cm²)を達成することができた。

文献

- (1) S.Kachi, M.Kimura and K.Shinoyama, Grated-Index-Type Crystalline Fiber for IR Light Transmission, Electronics Letters, Vol.22,(1986),p230-231.
- (2) T.Kanamori, Y.Terunuma, S.Takahashi and T.Miyashita, Transmission Loss Characteristics As₄₀S₆₀ and As₃₈Ge₅Se₅₇ Glass Unclad Fibers, J. Non-Cryst. Solids, Vol.69,(1985),p231-242.
- (3) J.A.Savage, Glass Forming Region and DTA Survey in the Ge-As-Te Memory Switching Glass System, J. Materials Science, Vol.6,(1971),p964-968.
- (4) J.A.Savage, Glass Forming Region and DTA Survey of Some Glasses in the Si-Ge-As-Te Threshold Switching Glass System, J. Materials Science, Vol.7,(1972),p64-67.
- (5) X.H.Zhang, G.Fonteneau and J.Lucas, Tellurium Halide Glasses. New Materials for Transmission in the 8-12 μ m Range, J. Non-Cryst. Solids, Vol.104,(1988),p38-44.
- (6) I.Inagawa, R.Iizuka, T.Yamagishi and R. Yokota, Optical and Thermal Properties of Chalcogenide Ge-As-Se-Te Glasses for IR Fibers, J. Non-Cryst.

Solids, Vol.95&96,(1987),p801-808.

- (7) J.Nishii, S.Morimoto, R.Yokota and T. Yamagishi, Transmission Loss of Ge-Se-Te and Ge-Se-Te-Tl Glass Fibers, J. Non-Cryst. Solids, Vol.95&96,(1987),p641-646.
- (8) I.Inagawa, T.Yamagishi and T. Yamashita, Transmission-Loss Spectra of Chalcogenide Se-Te-I Glass Fibers and Its Delivery of CO₂ Laser Power, J. J. Appl. Phys., Vol.30,(1991),p2846-2849.
- (9) M.Vlcek, L.Tichy, J.Klikorka and A.Triska, Influence of Oxygen Traces on Physical Properties of Glassy GeSe₂, J. Materials Science, Vol.22,(1987),p2119-2123.
- (10) R.P.Edwin, A Recording Refractometer for the Measurement of Refractive Indices of Solids in the Wavelength Range 8-14 μ m, J. Physics E: Scientific Instruments, Vol.6,(1973),p1035-1036.
- (11) J.Savege, P.J.Webber and A.N.Pitt, Infrared Optical Glasses for Applications in 8-12- μ m Thermal Imaging Systems, Applied Optics, Vol.16, No.11,(1977),p2938-2941.
- (12) A.R.Hilton, C.E.Jones, R.D.Dobrott, H.M.Klein, A.M.Bryant and T.D.George, Non-Oxide IVA-V A-VIA Chalcogenide Glasses. Part 3. Structural Studies, Phys. Chem. Glasses, Vol.7, No.4,(1966), p116-126.
- (13) A.R.Hilton, C.E.Jones and M.Brau, New High Temperature Infrared Transmitting Glasses-III, Infrared Physics, Vol.6,(1966),p183-194.
- (14) I.Inagawa, S.Morimoto, T.Yamashita and I.Shiroutani, Temperature Dependence of Transmission Loss of Chalcogenide Glass Fibers, J. J. Appl. Phys., Vol.36,(1997),p2229-2235.

Central Cycles in Graphs

Tadashi YAMAGUCHI*, Les FOULDS** and John LAMB***

(Received 8 May 1998, Accepted 31 August 1998)

We consider the problems of identifying subgraphs which are centres, medians, or centroids of a given simple, connected graph. The case where the subgraph comprises a discrete set of vertices is well known. However concepts which measure centrality in a graph, such as: eccentricity, distance, and subset cardinality, can be extended to connected subgraphs such as: paths, trees, and cycles. Methods have been reported which deal with the requirement that the subgraph is a path or a constrained tree. In this paper we extend this work to the case where the subgraph is required to be a cycle. We first examine the case where the underlying graph is a grid-graph. We then report on a tabu search-based heuristic and on randomized exchange methods for the identification of cycle centres, medians and centroids in general graphs.

Keywords : Graph, Network, Cycle, Location Problem

1 Introduction

This paper introduces some cycle location problems on graphs. Concepts which measure the centrality of a vertex in a graph (such as : eccentricity, distance and component cardinality) are extended to a cycle in a graph. Locating cycles with minimum eccentricity, distance and component cardinality may be viewed as multicentre, multimedian, and multicentroid problems respectively, where the facilities are located on vertices that must constitute a cycle. These problems are related to the traveling salesman and Hamiltonian cycle problems on graphs. We now introduce some notation and terminology.

Let $G = (V, E)$ denote a simple, connected, undirected graph with vertex set V (with $|V| = n$), and edge set E . For the graph theoretic notation and terminology used in this paper, see Foulds(1998). An edge between u and v is denoted by uv . The distance between vertices x and y , denoted by $d(x, y)$, is defined to be the length of a shortest path in G between vertices x and y , expressed as the number of edges.

The *eccentricity* of a vertex x , denoted by $e(x)$, is defined to be $e(x) = \max\{d(x, y) : y \in V\}$. The *diameter* of G , denoted by $diam(G)$, is defined to be $diam(G) = \max\{e(x) : x \in V\}$. The *radius* of G , denoted by $rad(G)$, is defined to be $rad(G) = \min\{e(x) : x \in V\}$. A vertex x of G is called a *centre* if $e(x) = rad(G)$. The distance of a vertex x , denoted by $d(x)$, is defined by $d(x) = \sum\{d(x, y) : y \in V\}$. The distance of G , denoted by $d(G)$, is defined by $d(G) = \sum\{d(x, y) : x, y \in V\}$.

We now extend these concepts from a single vertex to subsets of vertices, and also to cycles. For any subset $U \subseteq V$, and any $x \in V$, let $d(x, U) = \min\{d(x, u) : u \in U\}$. The *eccentricity* $e(U)$ of U is defined by $e(U) = \max\{d(x, U) : x \in V\}$, and the *distance* $d(U)$ of U is defined by $d(U) = \sum\{d(x, U) : x \in V\}$. The *weight* $w(U)$ is the largest number of vertices in a component of $G - U$.

We denote the vertex set of any cycle C in G by $V(C)$. Then $e(C) = e(V(C))$, $d(C) = d(V(C))$ and $w(C) = w(V(C))$ are called the *eccentricity*, the *distance* and the *weight* of the cycle C , respectively.

The length of a cycle C is the number of edges of C . A cycle with the length p is called by p -cycle.

Definition 1

A cycle C of G is:

- (1) A p -cycle center of G if $e(C) \leq e(C')$ for any p -cycle

* Common Subject Division(Mathematical Science)

** Waikato Management School, University of Waikato,
New Zealand

*** Canterbury Business School, University of Kent at Canterbury,
United Kingdom.

C' .

- (2) A p -cycle median of G if $d(C) \leq d(C')$ for any p -cycle C' .
- (3) A p -cycle centroid of G if $w(C) \geq w(C')$ for any p -cycle C' .

Definition 2

A cycle C of G is:

- (i) A *cycle centre* if C has minimum eccentricity among all cycles of G and has minimum length among cycles of G having minimum eccentricity.
- (ii) A *cycle median* if C has minimum distance among all cycles of G and has minimum length among all cycles of G having minimum distance.
- (iii) A *cycle centroid* if C has minimum weight among all cycles of G and has minimum length among all cycles of G having minimum weight.

We now discuss applications of these ideas, beginning with some which are well-known for original concepts of : centre, median, and centroid. In general, the theory of facilities location, well known in operations research and industrial engineering, is concerned with the location of one or more facilities which are sited so as to service a number of given clients. We confine our attention here to the location of facilities on graphs or networks, rather than in the plane.

The first application is concerned with the location of emergency facilities (e.g. emergency clinics, police stations, or fire stations) on a network. The objective is to minimize the greatest distance between any of the facilities and any of the clients. In terms of what we have discussed previously, this corresponds to the identification of the set of centres of the underlying graph, which will represent the locations of the facilities.

The second application is concerned with the location of non-emergency facilities (e.g. libraries, post offices, or government bureaus). The objective is to minimize the total distance between each client and the facility closest to it. In terms of what we have discussed previously, this corresponds to the identification of the set of medians of the underlying graph.

The third application is concerned with the location of special facilities (e.g. distribution, or communication centres). The objective is to minimize the size of any identifiable neighborhood of connected clients which is not part of the facility. In terms of what we have discussed previously, this corresponds to the identification of the set of centroids of the underlying graph.

Most facility location models assume that the facilities to be located can be represented by a disconnected set of vertices, possibly a singleton. However it is sometimes productive for the set of vertices to have a given structure within the underlying graph. For instance, the circumstance when the set constitutes a path or tree has been studied by Buckley and Harary(1990), Richey(1990), Hakimi(1993) and Slater(1980,1981,1982 and 1983). There

are applications when the vertex set is a tree, such as: the design of systems for gas reticulation, irrigation pipelines, or freeway systems. There are also applications when the vertex set is a path (a special type of tree), such as: the design of a new superhighway or a new subway line. We are concerned in this paper with the new special case in which the vertex set is a cycle. Examples of applications of this scenario include: the design of circular human communication networks in organizational structures, circular bus routes, and the creation of express ring roads in an urban environment.

Observation :

The following are equivalent:

- (1) G has a Hamiltonian cycle C .
- (2) G has a p -cycle centre C with $e(C) = 0$.
- (3) G has a p -cycle median C with $d(C) = 0$.
- (4) G has a p -cycle centroid C with $w(C) = 0$.

The problem of determining whether a given graph contains a Hamiltonian cycle is *NP*-complete(Garey and Johnson(1979)). Therefore, the problem of determining whether (2), (3), or (4) are true for a given graph are also *NP*-complete.

In the next two sections we discuss p -cycle centres and p -cycle medians in grid-graphs. In Section 4 some properties of the eccentricity, the distance and the weight of a cycle in general graphs will be established. In Section 5 we report on a tabu search technique which can be used for the same purpose. We summarize our findings, present some conclusions on them, and suggest directions for further research in Section 7.

2 Cycle centres in grid-graphs

For given positive integers $n_1 \geq 1, n_2 \geq 1$, a grid-graph $G_{n_1 \times n_2}(V, E)$ is defined as follows:

$$V = \{v_{ij} = (i, j) : 0 \leq i \leq n_1, 0 \leq j \leq n_2, i, j \text{ integers}\},$$

$$E = \{\{v_{ij}, v_{kl}\} : \{|i - k|, |j - l|\} = \{0, 1\}\}.$$

Theorem 1

- (1) If at least one of n_1, n_2 are odd, there exists a Hamilton cycle C with $e(C) = 0$.
- (2) If the numbers n_1, n_2 are both even, there exists a cycle C with $e(C) = 1$.

Now we restrict the problem to smaller cycles:

Problem 1

Among cycles with the rectangular form:

$$C : P(p_1, p_2), Q(p_1 + m_1, p_2), R(p_1 + m_1, p_2 + m_2)$$

$$\text{and } S(p_1, p_2 + m_2)$$

of $G_{n_1 \times n_2}(V, E)$, how can one characterize all m_1, m_2, p_1 , and p_2 with $\min e(C)$ such that $L(C)$ is least among all such cycles?

Here, n_1, n_2, m_1, m_2 are positive integers and $1 \leq m_i \leq n_i (i = 1, 2)$.

That is, the rectangle $C : PQRS$ on $G_{n_1 \times n_2}(V, E)$ with minimum eccentricity is to be characterized.

Let $O(0,0), X(n_1,0), Y(n_1,n_2), Z(0,n_2)$ be vertices of $G_{n_1 \times n_2}$.

Then $d(v, C) (v = O, X, Y, Z)$ are the following:

$$d(O, C) = d(O, P) = p_1 + p_2,$$

$$d(X, C) = d(X, Q) = n_1 - (p_1 + m_1) + p_2,$$

$$d(Y, C) = d(Y, R) = n_1 - (p_1 + m_2) + n_2 - (p_2 + m_2), \text{ and}$$

$$d(Z, C) = d(Z, S) = p_1 + n_2 - (p_2 + m_2).$$

Without loss of generality, we may assume that

$$p_1 \leq n_1 - (p_1 + m_1), \quad p_2 \leq n_2 - (p_2 + m_2). \quad (2.1)$$

Thus

$$\max d(v, C) = d(Y, C) = n_1 - (p_1 + m_1) + n_2 - (p_2 + m_2).$$

Let $e_{in}(C) = \max\{d(x, C) : x \text{ is inside } C\}$. Note that $e_{in}(C)$ is independent of the location of C and is constant.

Let $e_{out}(C) = \max\{d(x, C) : x \text{ is outside } C\}$.

Note that $e_{out}(C) = \max\{d(O, P), d(X, Q), d(Y, R), d(Z, S)\}$.

By symmetry, $e_{out}(C) = d(O, P) = p_1 + p_2$.

This is so because, by (2.1):

$$\begin{aligned} d(O, P) &= p_1 + p_2 \\ &\geq d(X, Q) = n_1 - (p_1 + m_1) + p_2 \\ &\geq d(Y, R) = n_1 - (p_1 + m_1) + n_2 - (p_2 + m_2) \\ &\geq d(Z, S) = p_1 + n_2 - (p_2 + m_2). \end{aligned}$$

By (2.1) again, $p_i \leq \lfloor (n_i - m_i)/2 \rfloor (i = 1, 2)$. (Here and in the following $\lfloor x \rfloor$ is the largest integer smaller than or equal to x .)

Then the minimum of $p_1 + p_2$ is $\lfloor (n_1 - m_1)/2 \rfloor + \lfloor (n_2 - m_2)/2 \rfloor$, which is $e_{out}(C)$. Then,

$$e(C) = \begin{cases} e_{in}(C), & \text{if } e_{in}(C) \geq e_{out}(C) \\ e_{out}(C), & \text{if } e_{in}(C) < e_{out}(C). \end{cases}$$

That is,

$$e(C) = \max\{e_{in}(C), e_{out}(C)\}.$$

Thus

$$e_{in}(C) = \min\{\lfloor m_1/2 \rfloor, \lfloor m_2/2 \rfloor\}.$$

Theorem 2

When $e_{in}(C) \geq e_{out}(C)$, $e(C)$ does not depend on the position of C . When $e_{in}(C) < e_{out}(C)$, the minimization of $e(C)$ is realized when $p_i = \lfloor n_i/2 - m_i/2 \rfloor (i = 1, 2)$.

3 Cycle medians in grid-graphs

Problem 2

Characterize the rectangular cycle with minimum distance.

Consider a grid-graph $G_{n_1 \times n_2}(V, E)$ with cycle C of size $m_1 \times m_2$. Let:

$$\begin{aligned} V &= \{0, 1, \dots, n_1\} \times \{0, 1, \dots, n_2\}, \\ P(p_1, p_2); \quad 0 \leq p_i \leq n_i (i = 1, 2), \text{ and} \\ C_P &= \{(p_1 + i, p_2 + j) : 0 \leq i \leq m_1, 0 \leq j \leq m_2\} \text{ (The} \\ &\text{inside of } C). \end{aligned}$$

In order to treat the distance of cycles in more detail, we define:

$$\begin{aligned} d_{in}(C; P) &= d_{in}(C) = \sum_{u \in C_P} d(u, C), \text{ and} \\ d_{out}(C; P) &= d_{out}(C) = \sum_{u \in V - C_P} d(u, C) \end{aligned}$$

Using these we have:

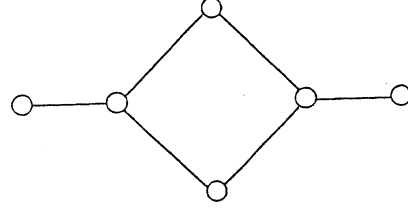


Figure 1: An extremal graph for inequality (4.1).

$$\begin{aligned} d(C; P) &= d_{in}(C; P) + d_{out}(C; P), \text{ and} \\ d(C) &= \min_P d(C; P). \end{aligned}$$

Here, $d_{in}(C; P)$ is independent of the position of C . So it is enough to consider the term $d_{out}(C; P)$. We first consider the grid-graph $G_{x \times y}$.

Let $d(x, y, y')$ be $\sum_{(i,j) \in V'} d((i, j), P')$, where V' is the vertex set of $G_{x \times y}$ and P' is the boundary path: $\{(x, j) | y' \leq j \leq y\}$. By an elementary calculation, we obtain:

$$d(x, y, y') = (x + 1)S(y') + (y + 1)S(x), \text{ where } S(t) = t(t + 1)/2.$$

$$\text{Let } d_i = n_i - m_i, q_i = d_i - p_i (i = 1, 2).$$

Then

$$\begin{aligned} d_{out}(C) &= d(p_1, p_2 + m_2 - 1, p_2) + d(q_2, p_1 + m_1 - 1, p_1) \\ &+ d(q_1, n_2 - p_2 - 1, q_2) + d(p_2, n_1 - p_1 - 1, q_1). \end{aligned}$$

Thus,

$$d_{out}(C) = n_2\{S(p_1) + S(q_1)\} + n_1\{S(p_2) + S(q_2)\}.$$

Theorem 3

The minimization of $d_{out}(C)$ is also realized when $p_i = \lfloor n_i/2 - m_i/2 \rfloor (i = 1, 2)$.

4 Centrality measures of general graphs

In this section, we present some properties concerning with the eccentricity, the distance and the weight of a cycle in general graphs. Let $L(C)$ be the length of any cycle C and $diam(C) = \max\{d(x, y) : x, y \in C\}$.

First we state a simple property.

Theorem 4

$$diam(G) \leq 2e(C) + diam(C). \quad (4.1)$$

The above bound is sharp, as shown for the graph in Figure 1, where $diam(G) = 4$, $diam(C) = 2$, and $e(C) = 1$.

Corollary

$$\text{If } L(C) \leq l \text{ then } e(C) \geq \{diam(G) - l/2\}/2. \quad (4.2)$$

That is, a cycle C , for which $L(C) = l$, $diam(C) = l/2$, and $e(C) = \{diam(G) - l/2\}/2$, is a cycle centre.

Of course, such a cycle does not exist in certain graphs.

We now state a relationship between $e(C)$ and $d(C)$. Recall that the number of vertices in the underlying graph G , is denoted by n .

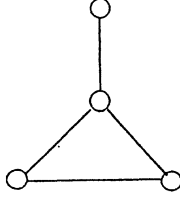


Figure 2: An extremal graph for inequality (4.3).

Theorem 5

$$d(C) \leq (n - L(C))e(C). \quad (4.3)$$

The above bound is sharp, as shown for the graph in Figure 2, where $d(C) = 1$, $n = 4$, $L(C) = 3$, and $e(C) = 1$.

Let $w(G) = \min\{w(C) : C \text{ is a cycle of } G\}$. A cycle C of G is called a dominating cycle when the vertex set of $G - C$ (the resultant of removing C from G) is a stable (independent) set of G . More generally, a cycle C of G is called a k -dominating cycle when the cardinality of vertices of each component of $G - C$ is less or equal to k .

Theorem 6

- (1) If a graph G has a dominating cycle, then $w(G) \leq 1$.
- (2) If a graph G has a k -dominating cycle, then $w(G) \leq k$.

We get the following:

Theorem 7

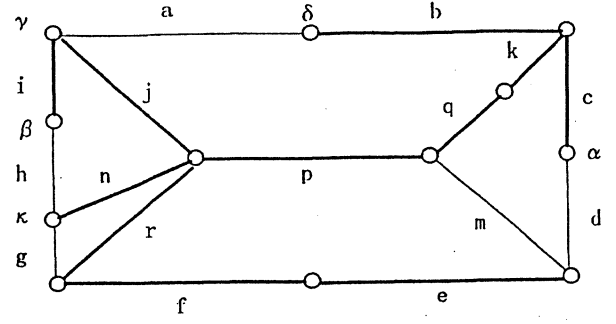
For any integers k, l such that $0 \leq k < l$, there exists a graph G which has a cycle C with $w(C) = k$ and $L(C) = l$.

5 A tabu search heuristic

The following two sections are concerned with algorithmic aspects about central cycles defined by Definition 2. We now present a heuristic (which does not necessarily find the best possible central cycle in any given graph) based on the tabu search (TS) metaheuristic of Glover (1997). The same general TS procedure can be used to attempt to find either the cycle centre, the cycle median or the cycle centroid of any given graph G . We provide a simple overview of the procedure first, followed by a more rigorous description later.

The procedure requires, as input, a spanning tree T of G . Next the fundamental cycles in G with respect to T are identified by adding each of the chords in G singly to T . If a cycle is known or suspected to be central, or somewhat close to being central, then we suggest that T should be chosen so that this cycle is fundamental with respect to it. If no such information is known then T is chosen at random.

The method proceeds by transforming T at each iteration by successively dropping one of its edges and adding a new chord to create a new spanning tree. $z(C)$ (with the subscript E or D , or W according to the type of centrality desired) is termed the *cost* of any cycle in G and is to be minimized. The edge swap is performed in such a way so as to produce a fundamental cycle C in the new spanning tree which is as central as possible, in the sense

Figure 3: The initial graph for the Tabu Search : T^1 .

that $z(C)$ is as low as possible. The best cycle identified at each iteration is recorded so as to prevent cycling. Once an edge is dropped from T , it is tabu (for a certain number of iterations) to make it part of T again.

The objective functions are:

$$z_E(C) = Me(C) + L(C) \text{ [centre],}$$

$$z_D(C) = Md(C) + L(C) \text{ [median],}$$

$$z_W(C) = Mw(C) + L(C) \text{ [centroid],}$$

where M is a suitably large number. For example, M can be conveniently chosen as : $M = 10|V|$.

The least cost cycle found so far is recorded and updated.

The Choice Rule:

Make the edge swap in T that produces the *new* fundamental cycle with least cost. The edge dropped must be part of the best cycle identified in the last iteration. Thus adding the chord that induced the current best fundamental cycle in the last iteration cannot be added.

Tabu Restriction:

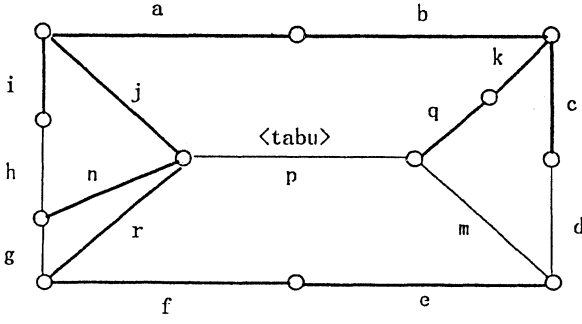
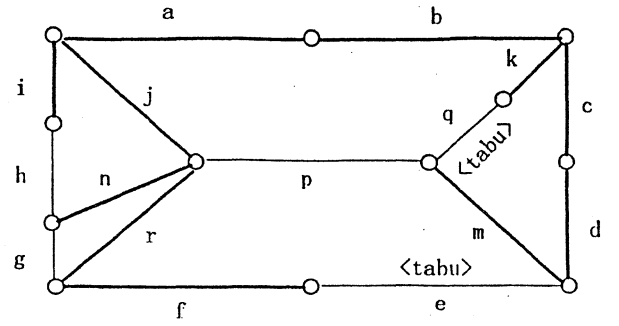
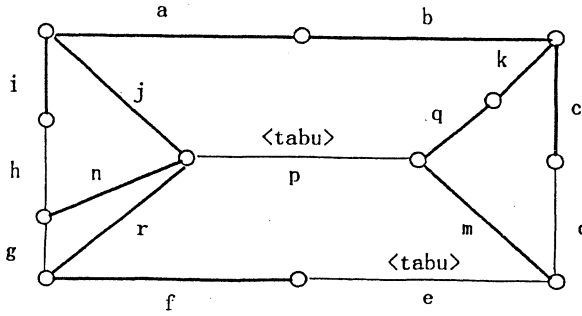
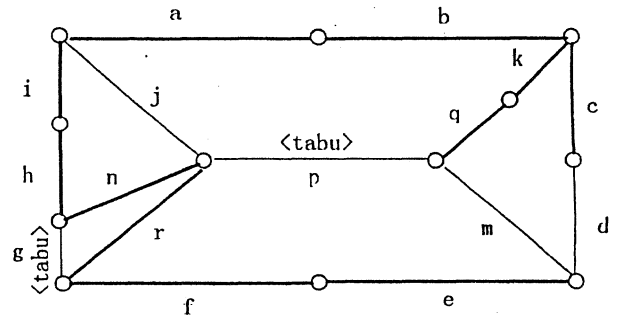
Make tabu adding to T an edge e , dropped from T for m iterations, where m is chosen appropriately. It is often convenient to begin by setting $m = 2$.

Aspiration Criterion:

Override the tabu restriction if a different edge swap produces a new least cost cycle which is the best cycle found so far.

The TS heuristic will now be illustrated on the graph G shown in Figures 3 and on. Let $M = 100$ and $m = 2$ throughout. We begin with the objective of attempting to find the cycle centre of the graph, i.e. minimizing $z_E(C)$.

The initial spanning tree T^1 which was chosen at random, is shown by the heavy edges: $b, c, e, f, i, j, k, n, p, q$, and r in Figure 3. T^1 induces five fundamental cycles of G , each constructed by adding exactly one of the chords: a, d, g, h , and m to T^1 . We now denote T^1 by T_E^1 . For example the chord h induces the fundamental cycle $C_h^1 = \langle h, i, j, n \rangle$, with eccentricity 3, due to the fact that vertex α is of distance 3 from C_h^1 . The superscript 1 indicates that this cycle is fundamental with respect to T_E^1 . As C_h^1 has length 4, $z_E(C_h^1) = 100 \times 3 + 4 = 304$. However $C_m^1 = \langle m, e, f, r, p \rangle$, with $z_E(C_m^1) = 205$, is the fundamental cycle with respect to T_E^1 with the lowest z_E value. Thus it is recorded as the best cycle found so far. The next step is to drop one of the edges in $T_E^1 \cap C_m^1 = \{e, f, r, p\}$ and add another edge to T^1 to produce T_E^2 . This edge swap must be selected so as to minimize the z_E value of the best of fundamental cycles with respect to T_E^2 . The least cost


 Figure 4: Central cycle search : T_E^2 , T_D^2 , and T_W^2 .

 Figure 6: T_E^4 and the cycle centre C_p^4 .

 Figure 5: Cycle centre search : T_E^3 .

 Figure 7: T_D^3 and the cycle median C_m^3 .

edge swap involves dropping edge p and adding edge a . This creates the spanning tree T_E^2 shown with heavy lines in Figure 4.

The least cost cycle is $C_d^2 = \langle d, e, f, r, j, a, b, c \rangle$ with $z_E(C_d^2) = 108$. This cycle is recorded as the best (least cost) cycle found so far. We make it tabu to add edge p to any spanning tree for 2 iterations.

This above process is now repeated. The least cost edge swap involves dropping edge e and adding edge m . We make the addition of edge e tabu for 2 iterations. This creates the spanning tree T_E^3 , shown in Figure 5. The least cost new cycle is $C_e^3 = \langle e, f, r, j, a, b, k, q, m \rangle$, with $z_E(C_e^3) = 109 (> 108)$. This is a result of the above choice rule, which forbids the addition of edge d , as doing this would merely reproduce cycle C_d^2 .

Note that this objective function value is higher than that found in the previous iteration. Thus the search has moved to an (intermediate) inferior solution. We now start the third iteration and begin by removing the tabu ban on adding edge p to the tree.

The least cost edge swap involves dropping edge q and adding edge d . We make the addition of edge q tabu for 2 iterations. This creates the spanning tree T_E^4 shown in Figure 6. The least cost cycle is $C_p^4 = \langle p, j, a, b, c, d, m \rangle$, with $z_E(C_p^4) = 107$. This cycle has the lowest possible objective function value of all the cycles in G . Thus we have identified cycle C_p^4 as the (unique) cycle centre C_p^4 , and the search is terminated.

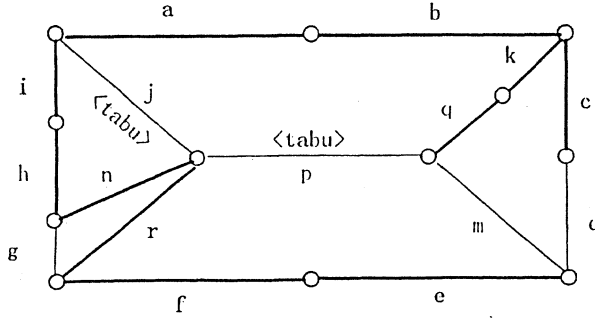
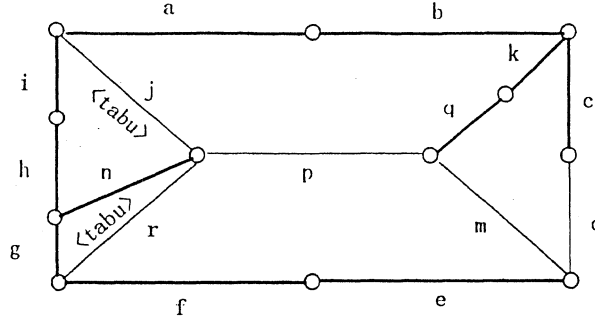
We now go on to illustrate the same general tabu search procedure used above for cycle centre identification to attempt to find the cycle median for the graph in Figure 3, starting once again with the spanning tree T^1 , now denoted by T_D^1 . In this case, the least cost fundamental cycle is $C_d^1 = \langle d, e, f, r, p, q, k, c \rangle$. The value $z_D(C_d^1)$ is calcu-

lated by summing the distances to C_d^1 of all the vertices of G not on C_d^1 . These are (with their distances in parentheses): $\kappa(1), \beta(2), \gamma(1)$, and $\delta(1)$. As C_d^1 has length 8: $z_D(C_d^1) = 100(1 + 2 + 1 + 1) + 8 = 508$.

The least cost edge swap involves dropping edge p and adding edge a . We make the addition of edge p tabu for 2 iterations. This creates the spanning tree T_D^2 shown in Figure 4. The least cost cycle is $C_m^2 = \langle m, e, f, r, j, a, b, k, q \rangle$, with $z_D(C_m^2) = 309$. This cycle is recorded as the best found so far.

This process is now repeated. The least cost edge swap involves dropping edge j and adding edge h . We make the addition of edge j tabu for 2 iterations. This produces a new least cost cycle which is the best found so far, as shown in Figure 7, with T_D^3 and $C_m^3 = \langle m, e, f, r, n, h, i, a, b, k, q \rangle$, and $z_D(C_m^3) = 111$. As C_m^3 is the cycle median, the search is terminated.

We now go on to illustrate the same general tabu search procedure, used twice before, to attempt to find the cycle centroid for the graph in Figure 3, starting once again with the spanning tree T^1 , now denoted by T_W^1 . In this case, the least cost cycle is: $C_d^1 = \langle d, e, f, r, p, q, k, c \rangle$. The value $z_W(C_d^1)$ is calculated by first identifying the number of vertices in the largest component of $G - C_d^1$. This is the component comprising the path $\langle a, i, h \rangle$, which has 4 vertices. As C_d^1 has length 8: $z_W(C_d^1) = 100 \times 4 + 8 = 408$. The least cost edge swap involves dropping edge p and adding edge a . We make the addition of edge p tabu for 2 iterations. This creates spanning tree T_W^2 , shown in Figure 4. (We have performed the same edge swap as used previously for centres and medians.) The least cost cycle is $C_d^2 = \langle d, e, f, r, j, a, b, c \rangle$, with $z_W(C_d^2) = 208$. This cycle is recorded as the best cycle found so far. This process is now repeated. The least cost edge swap involves drop-

Figure 8: Cycle centroid search : T_W^3 .Figure 9: T_W^4 and the cycle centroid C_m^4 .

ping edge j and adding edge h . We make the addition of edge j tabu for 2 iterations. This creates the spanning tree T_W^3 , shown in Figure 8. The least cost cycle is: $C_m^3 = \langle m, e, f, r, n, h, i, a, b, k, q \rangle$, with $z_W(C_m^3) = 111$. This cycle is recorded as the best found so far. We now repeat the process (as it turns out for the last time) to identify the cycle centroid. First we must remove the tabu ban on adding edge p to the tree. The least cost edge swap involves dropping edge r and adding edge g . We make the addition of edge r tabu for 2 iterations. This creates the spanning tree T_W^4 shown in Figure 9. The least cost cycle is: $C_m^4 = \langle m, e, f, g, h, i, a, b, k, q \rangle$, with $z_W(C_m^4) = 110$. This cycle has the lowest possible objective function value of all cycles in G . Thus we have identified the cycle centroid C_m^4 , and the search is terminated.

We now go on to discuss an alternative approach to identifying central cycles, via randomized edge swapping.

6 Randomized edge swapping

We have also experimented with another procedure for identifying central cycles, based on random edge swapping in a spanning tree of G . The process involves the same fundamentals as for the tabu search heuristic described in the previous section. Once again we begin with a spanning tree of G , and also transform it, at each iteration, by a single edge swap, identifying the induced fundamental cycles.

However, unlike tabu search, the edge swap is selected at random at each iteration. This approach was tested on many large graphs. These graphs were generated by choosing a number n of vertices and choosing edges independently so that each possible edge is contained in the graph with the same probability p . The method identified

a cycle centre in every case for which it was possible to check the result exactly. However three points should be noted.

1. If a Hamiltonian cycle is found then clearly it is a cycle centre. If the graph was not 2-connected, then in every case it turned out to be non-Hamiltonian.
2. Hamiltonian cycles appear very suddenly in random graphs generated by this method. It has been shown (see Bollobás(1985)) that if $\omega(n) \rightarrow \infty$ as $n \rightarrow \infty$, then almost every graph generated will be Hamiltonian if $p = (1/n)(\log n + \log \log n + \omega(n))$ and almost every graph will be non-Hamiltonian if $p = (1/n)(\log n + \log \log n)$.
3. The process is wasteful in that it creates the same spanning tree rather frequently.
4. In real applications, this process is not likely to represent the kind of networks of interest, which may be planar or nearly planar, or may not have edges appearing independently.

We have also tested the same method on graphs generated by the following random process, described in Bollobás(1985). Let $V = \{1, \dots, n\}$ be a set of vertices and define a graph process to be a sequence $\tilde{G} = (G_t)_{t=0}^N$ of graphs on V such that:

- (i) each graph G_t has t edges, and
- (ii) $G_0 \subset G_1 \subset G_2 \subset \dots$

We choose a graph process uniformly and randomly and choose the first t for which G_t has minimum degree 2. Bollobás and Thomason(1985) showed that, as $n \rightarrow \infty$, almost every G_t chosen by this method is 2-connected. Also Bollobás(1984) showed that as $n \rightarrow \infty$ almost every G_t chosen by this method is Hamiltonian. Clearly a graph is 2-connected if it is Hamiltonian, and clearly we can restrict the search for cycle centres to maximal 2-connected subgraphs of the graph G we are investigating. This random graph process was useful for generating 2-connected graphs that were not Hamiltonian, and for these the randomised edge swapping heuristic was very poor at finding cycle centres for the cases that could be checked exhaustively.

7 Conclusions

Slater(1980,1981,1982 and 1983) analyzed the problems of finding central restricted trees and central paths in graphs. We have extended this to analyzing the problem of finding central cycles in graphs. The problems are related to the covering salesman problem (see Mesa and Boffey(1996) and Current and Schilling(1989,1994)). These authors formulated the problem as a zero-one integer programming model and solved it by a heuristic based on solution procedures for the set covering problem. Note that the set covering problem for graphs of a special type (i.e. a kind of chordal graph) can be solved in polynomial time (Kolen and Tamir(1990)).

We have produced some techniques for the identification of central cycles. However much more needs to be done in this area in order to provide useful results to underpin techniques which are effective. The importance of this is

underlined by our efforts to construct an integer programming method upon which to base algorithms which guarantee optimal central cycles. We plan to publish this work elsewhere.

References

- [1] Bollobás, B. The evolution of sparse graphs, In: **Graph Theory and Combinatorics**, Proc. Cambridge Combinatorial Conference in honour of Paul Erdős (Bollobás, B., Ed.), Academic Press (1984) 35-37.
- [2] Bollobás, B. , **Random Graphs**, Academic Press, 1985.
- [3] Bollobás, B., Thomason, C. , Random graphs of small order, In Random Graphs, **Annals of Discrete Mathematics**, 1985.
- [4] Buckley, F., Harary, F. , **Distance in Graphs**, Addison-Wesley, 1990.
- [5] Current, J. R. and Schilling, D. A. , The Covering Salesman Problem, **Transportation Science**, 23(1989) 208-213.
- [6] Current, J. R. and Schilling, D. A. , The Median Tour and Maximal Covering Tour Problems : Formulations and Heuristics, **European Journal of Operational Research**, 73(1994) 114-126.
- [7] Foulds, L. R. , **Graph Theory Applications**, 3rd printing, Springer, 1998.
- [8] Garey, M. R. and Johnson, D. S. , **Computers and Intractability**, Freeman and Company, 1979.
- [9] Glover, F. and Languna, M. , **Tabu search**, Kluwer, 1997.
- [10] Hakimi, S. L., Schmeichel, E. F. and Labbe, M. , On Locating Path- or Tree-Shaped Facilities on Networks, **Networks**, 23(1993) 543-555.
- [11] Kolen, A. and Tamir, A. , Covering Problem, In Mirchandani, P. B. and Francis, R. L.(ed.), **Discrete Location Theory**, Wiley Interscience, 1990.
- [12] Mesa, J. A. and Boffey, T. B. , A Review of Extensive Facility Location in Networks, **European Journal of Operational Research**, 95(1996) 592-603.
- [13] Rickey, M. B. , Optimal Location of a Path or Tree on a Network with Cycles, **Networks**, 20(1990) 391-407.
- [14] Slater, P. J. , Centrality of Paths and Vertices in a Graph, Cores and Pits, **Lecture Notes in Mathematics**, The Theory and Applications of Graphs, Springer-Verlag, 1980.
- [15] Slater, P. J. , On Locating a Facility to Service Areas with a Network, **Operations Research**, 29(1981) 523-531
- [16] Slater, P. J. , Locating Central Paths in a Graph, **Transportation Science**, 16(1982) 1-18.
- [17] Slater, P. J. , Some Definitions of Central Structures, **Lecture Notes in Mathematics**, 1073, Graph Theory, Springer-Verlag, 1983.

グラフにおける中心的サイクル
山口 忠*, L. フォルド**, J. ラム***
概要

本論文では、グラフにおけるサイクル配置問題、即ちグラフにおけるサイクルの位置についてのある評価基準（中心性、平均距離等）のもとでの最適配置を扱っている。与えられた単純連結グラフにおけるセンター、メディアン又はセントロイドという部分グラフを求める問題である。部分グラフが離散的な頂点集合は今までよく扱われている。これをサイクルのような構造をもった部分グラフへ拡張している。まず、格子グラフでのサイクル配置、一般のグラフでの関係する評価基準の性質を調べ、次いで、タブ探索の適用について述べ、最後にランダム探索での近似解についての考察をしている。

キーワード：グラフ、ネットワーク、サイクル、配置問題

* 共通講座 (数理科学), ** ワイカト大学経営学部, *** カンタベリ・ケント大学商学部

Numerical Estimation on Correlation Inequalities for Holley-Liggett Bounds

Alex Yu. TRETYAKOV*, Vladimir BELITSKY**, Norio KONNO*** and Tadashi YAMAGUCHI****

(Received 8 May 1998, Accepted 31 August 1998)

Holley and Liggett gave good bounds on critical value and survival probability for the basic contact process in one dimension by a suitable renewal measure. On the other hand, the same bounds can be obtained by assuming a class of correlation inequalities holds. In this paper we give numerical evidence for validity of some of the above correlation inequalities.

Keywords: Correlation Inequality, Contact Process, Critical Value, Holley-Liggett Method

1 INTRODUCTION

In this paper we consider correlation inequalities which give upper bound on the critical value and lower bound on the survival probability of the basic contact process in one dimension. These bounds were obtained by Holley and Liggett⁽¹⁾ using a different method based on the Harris lemma.⁽²⁾ Concerning the Harris lemma, see Chapter 3 in Konno,⁽³⁾ for example. In the present paper we call their method the *Holley-Liggett method*.

First we introduce some notations. The dynamics of the basic contact process in one dimension is as follows. For any $x \in \xi$ with $\xi \subset \mathbb{Z}^1$,

$$\begin{aligned} \xi &\rightarrow \xi \cup \{x-1\} && \text{at rate } \lambda, \\ \xi &\rightarrow \xi \cup \{x+1\} && \text{at rate } \lambda, \\ \xi &\rightarrow \xi \setminus \{x\} && \text{at rate } 1. \end{aligned}$$

Let ξ_t^0 be the basic contact process starting from the

origin. We define the *survival probability* for this process by

$$\rho_\lambda = P\{\xi_t^0 \neq \emptyset \text{ for any } t \geq 0\}.$$

The *critical value* on the basic contact process can be defined by

$$\lambda_c = \inf\{\lambda \geq 0 : \rho_\lambda > 0\}.$$

The best estimated value of this critical value is 1.648912 given by Jensen and Dickmann.⁽⁴⁾ Concerning upper bound on λ_c and lower bound on ρ_λ , Holley and Liggett⁽¹⁾ gave the following good bounds by choosing a suitable renewal measure:

$$\lambda_c \leq \lambda_c^{(HL)} = 2,$$

and

$$\rho_\lambda \geq \rho_\lambda^{(HL)} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{2\lambda}} \quad \text{for } \lambda \geq 2.$$

We call these bounds *Holley-Liggett bounds* from now on. On the other hand, if we assume the following correlation inequalities hold: for $m, n \geq 1$, $J(0,0)J(m,n) \leq J(m,0)J(n,0)$, then we can obtain the same Holley-Liggett bounds, where $J(m,n)$ is the probability of having 1 at m and 0's at all other sites in $[1, m+n+1]$ with

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980

**Instituto de Mathematica e Estatistica, Universidade de Sao Paulo, Cx. Postal 66281, 05389-970 Sao Paulo, BRASIL

*** Department of Applied Mathematics, Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240

**** Common Subject Division (Mathematical Science)

respect to ν_λ which is the invariant measure of the basic contact process starting from the state \mathbf{Z}^1 . If \circ and \bullet represent 0 and 1 respectively, then we can write

$$J(m, n) = \nu_\lambda(\underbrace{\circ \dots \circ}_m \bullet \underbrace{\circ \dots \circ}_n).$$

For example,

$$\begin{aligned} J(0, 0) &= \nu_\lambda\{\eta : \eta(1) = 1\} = \nu_\lambda(\bullet) = \rho_\lambda, \\ J(1, 2) &= \nu_\lambda\{\eta : \eta(1) = 0, \eta(2) = 1, \\ &\quad \eta(3) = \eta(4) = 0\} = \nu_\lambda(\circ \bullet \circ \circ). \end{aligned}$$

The above mentioned approach is different from the Holley-Liggett method. The problem is that it is not known whether the above correlation inequalities hold or not for any $m, n \geq 1$. At the present stage, the only known thing is that there are $m, n \geq 1$ such that $J(0, 0)J(m, n) \leq J(m, 0)J(n, 0)$, as shown by Liggett.⁽⁶⁾ So the main purpose of this paper is to check whether $J(0, 0)J(m, n) \leq J(m, 0)J(n, 0)$ holds for small $m, n \geq 1$ by Monte Carlo simulation. In fact, even when $m = n = 1$, this correlation inequality is interesting. The reason is as follows. From the Harris-FKG inequality, we have

$$\nu_\lambda(\bullet\bullet) \geq \nu_\lambda(\bullet)^2, \quad (1.1)$$

and

$$\nu_\lambda(\circ\circ) \geq \nu_\lambda(\circ)^2. \quad (1.2)$$

Concerning the Harris-FKG inequality, see Chapter II in Liggett,⁽⁶⁾ or page 21 in Konno.⁽³⁾ We can rewrite Eqs.(1.1) and (1.2) by using the conditional probability:

$$\nu_\lambda(\bullet|\bullet) \geq \nu_\lambda(\bullet), \quad (1.3)$$

and

$$\nu_\lambda(\circ|\circ) \geq \nu_\lambda(\circ), \quad (1.4)$$

where

$$\nu_\lambda(\bullet|\bullet) = \nu_\lambda\{\eta : \eta(1) = 1 | \eta(0) = 1\},$$

$$\nu_\lambda(\circ|\circ) = \nu_\lambda\{\eta : \eta(1) = 0 | \eta(0) = 0\}.$$

Moreover, in our setting, the following correlation inequalities were proved by Belitsky, Ferrari, Konno and Liggett recently:⁽⁷⁾ for any $A, B \subset \mathbf{Z}^1$,

$$\bar{p}_\lambda(A \cap B) \bar{p}_\lambda(A \cup B) \geq \bar{p}_\lambda(A) \bar{p}_\lambda(B), \quad (1.5)$$

where $\bar{p}_\lambda(A) = \nu_\lambda\{\eta(x) = 0 \text{ for any } x \in A\}$. In particular, if we take $A = \{-1, 0\}$ and $B = \{0, 1\}$, then we have

$$\nu_\lambda(\circ)\nu_\lambda(\circ \circ \circ) \geq \nu_\lambda(\circ \circ)^2, \quad (1.6)$$

so this becomes

$$\nu_\lambda(\circ|\circ \circ) \geq \nu_\lambda(\circ|\circ), \quad (1.7)$$

where

$$\nu_\lambda(\circ|\circ \circ) = \nu_\lambda\{\eta : \eta(1) = 0 | \eta(0) = \eta(-1) = 0\}.$$

On the other hand, when $m = n = 1$ for the correlation inequalities we consider in this paper, we have

$$\nu_\lambda(\bullet)\nu_\lambda(\bullet\bullet\bullet) \leq \nu_\lambda(\bullet\bullet)^2, \quad (1.8)$$

that is,

$$\nu_\lambda(\bullet|\bullet\bullet) \leq \nu_\lambda(\bullet|\bullet), \quad (1.9)$$

where

$$\nu_\lambda(\bullet|\bullet\bullet) = \nu_\lambda\{\eta : \eta(1) = 1 | \eta(0) = \eta(-1) = 1\}.$$

The interesting thing is that a direction of inequality (1.9) is different from those of inequalities (1.3), (1.4) and (1.7). From the attractiveness (see page 72 in Liggett⁽⁶⁾), we can easily expect that inequalities (1.3) and (1.4) hold, moreover, inequality (1.7) also holds. However, concerning inequality (1.9), we can not easily conclude which direction of inequality is correct. Our estimation by Monte Carlo simulation suggests that inequality (1.9) holds. This is one of the interesting conclusions of this paper.

This paper is organized as follows. In Section 2, we briefly review the results of the Holley-Liggett method. In Section 3, we show how we can derive Holley-Liggett bounds from correlation inequalities. Section 4 treats numerical evidences on some of correlation inequalities. Moreover we give results on oriented percolation. Section 5 is devoted to conclusions.

2 HOLLEY-LIGGETT METHOD

First we introduce the following renewal measure μ on $\{0, 1\}^{\mathbf{Z}}$ with density f is given by

$$\mu(\underbrace{\bullet \dots \bullet}_{n_1} \underbrace{\bullet \dots \bullet}_{n_2} \bullet \dots \bullet \underbrace{\bullet \dots \bullet}_{n_k} \bullet) = \frac{f(n_1 + 1)f(n_2 + 1) \dots f(n_k + 1)}{\sum_{m=1}^{\infty} m f(m)},$$

where $\mu(n_1, n_2, \dots, n_k)$ be the probability of having 1's at $n_1 + 1, n_1 + n_2 + 2, \dots, n_1 + n_2 + \dots + n_{k-1} + k - 1$ and 0's at all other sites in $[1, n_1 + n_2 + \dots + n_k + k - 1]$ with respect to the renewal measure μ , for $k \geq 2$ and $n_i \geq 0$ ($i = 1, \dots, k$). Let Y the collection of all finite subsets of \mathbf{Z}^1 and for any $A \in Y$,

$$\sigma_\lambda(A) = P\{\xi_t^A \neq \phi \text{ for any } t \geq 0\},$$

where ξ_t^A be the basic contact process starting from A . By using the Harris lemma, the following theorem is obtained, see Chapter VI of Liggett,⁽⁶⁾ for example.

Theorem 2.1. Let $\lambda_c^{(HL)} = 2$. Then for $\lambda \geq \lambda_c^{(HL)}$,

$$h_\lambda^{(HL)}(A) \leq \sigma_\lambda(A) \quad \text{for all } A \in Y,$$

where

$$h_\lambda^{(HL)}(A) = \mu\{\eta : \eta(x) = 1 \text{ for some } x \in A\},$$

for a renewal measure μ on $\{0, 1\}^{\mathbf{Z}}$ whose density f is given by $\Omega^* h_\lambda^{(HL)}(A) = 0$ for all A of the form $\{1, 2, \dots, n\}$ ($n \geq 1$), and Ω^* is the generator of dual process for the basic contact process in one dimension.

Note that the above f is given as follows: for $n \geq 1$,

$$f(n) = F(n) - F(n+1), \quad \text{and}$$

$$F(n) = \frac{(2(n-1))!}{(n-1)!n!(2\lambda)^{n-1}}.$$

Applying Theorem 2.1 to $A = \{1\}$ gives Holley-Liggett bounds:

Corollary 2.2.

$$\lambda_c \leq \lambda_c^{(HL)} = 2, \\ \rho_\lambda \geq \rho_\lambda^{(HL)} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{2\lambda}} \quad (\lambda \geq 2).$$

3 CORRELATION INEQUALITIES

In this section, we review how we can derive Holley-Liggett bounds from the correlation inequalities. A similar argument appeared in Chapter 4 of Konno.⁽³⁾ Compared with the Holley-Liggett method, we can easily obtain Holley-Liggett bounds by assuming these correlation identities hold.

Here we introduce the following correlation functions: for $m, n \geq 0$, we let $J(m, n)$ be the probability of having 1's at m and 0's at all other sites in $[1, m+n+1]$ with respect to ν_λ which is an invariant measure starting from all sites are covered by 1's. That is,

$$J(m, n) = \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^m \bullet \overbrace{\circ \cdots \circ}^n).$$

From the definition of the basic contact process in one dimension, we have the following correlation identities:

$$\lambda [\bar{\rho}_\lambda(\{0, 1, \dots, n\}) - \bar{\rho}_\lambda(\{1, \dots, n\})] + \\ \lambda [\bar{\rho}_\lambda(\{1, \dots, n, n+1\}) - \bar{\rho}_\lambda(\{1, \dots, n\})] + \\ \sum_{k=1}^n [\bar{\rho}_\lambda(\{1, \dots, n\} \setminus \{k\}) - \bar{\rho}_\lambda(\{1, \dots, n\})] = 0,$$

where $\bar{\rho}_\lambda(A) = \nu_\lambda\{\eta(x) = 0 \text{ for any } x \in A\}$. So the definition of $J(m, n)$ gives

Lemma 3.1. For $n \geq 1$,

$$2\lambda J(n, 0) = \sum_{k=1}^n J(k-1, n-k),$$

that is,

$$2\lambda \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^n \bullet) = \sum_{k=1}^n \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^{k-1} \bullet \overbrace{\circ \cdots \circ}^{n-k}).$$

Next we introduce the following conjecture to get Holley-Liggett bounds. This was conjectured by Konno⁽³⁾ (see Conjecture 4.5.2).

Conjecture 3.2. For $m, n \geq 1$,

$$J(0, 0)J(m, n) \leq J(m, 0)J(n, 0),$$

that is,

$$\nu_\lambda(\bullet) \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^m \bullet \overbrace{\circ \cdots \circ}^n) \leq \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^m \bullet) \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^n \bullet).$$

When m or n is equal to 0, this inequality becomes equality. Define

$$\bar{J}(m, n) = \frac{\nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^m \bullet \overbrace{\circ \cdots \circ}^n)}{\nu_\lambda(\bullet)} = \frac{J(m, n)}{J(0, 0)},$$

for $\lambda > \lambda_c$ and $m, n \geq 0$. Note that the definition of λ_c gives $J(0, 0) = \nu_\lambda(\bullet) = \rho_\lambda > 0$ for $\lambda > \lambda_c$. By using $\bar{J}(m, n)$, we can rewrite the above conjecture as follows.

Conjecture 3.3. For $\lambda > \lambda_c$ and $m, n \geq 1$,

$$\bar{J}(m, n) \leq \bar{J}(m, 0)\bar{J}(n, 0).$$

Here we introduce the generating function of the sequence $\bar{J}(n, 0)$:

$$\varphi(u) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{J}(n, 0)u^{n+1}.$$

By using this, Lemma 3.1 can be rewritten as

$$2\lambda \bar{J}(n, 0) = \sum_{k=1}^n \bar{J}(k-1, n-k). \quad (3.1)$$

From the definition of $\varphi(u)$, we see that

$$\sum_{n=1}^{\infty} [\bar{J}(n, 0)u^{n+1}] = \varphi(u) - u. \quad (3.2)$$

Assume Conjecture 3.3. So we have

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^n \bar{J}(k-1, n-k)u^{n+1} \leq \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^n \bar{J}(k-1, 0)\bar{J}(n-k, 0)u^{n+1}. \quad (3.3)$$

The definition of $\varphi(u)$ and Eq.(3.3) give

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^n \bar{J}(k-1, n-k)u^{n+1} \leq \varphi(u)^2. \quad (3.4)$$

By Eqs.(3.1), (3.2) and (3.4), we have

$$\varphi^2(u) - 2\lambda\varphi(u) + 2\lambda u \geq 0. \quad (3.5)$$

Note that if $\lambda > \lambda_c$, then

$$\varphi(1) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{J}(n, 0) = \frac{1}{\bar{J}(0, 0)} = \frac{1}{\rho_\lambda}. \quad (3.6)$$

For $\lambda > \lambda_c$, the second equality follows from

$$\sum_{n=0}^{\infty} \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^n \bullet) = \\ \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^n) - \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^{n+1}) \right\} = \\ 1 - \lim_{n \rightarrow \infty} \nu_\lambda(\overbrace{\circ \cdots \circ}^n) = 1.$$

From Eq.(3.5) with $u = 1$ and Eq.(3.6), we have

$$2\lambda\rho_\lambda^2 - 2\lambda\rho_\lambda + 1 \geq 0. \quad (3.7)$$

So the properties of continuity and monotonicity for ρ_λ imply

$$\rho_\lambda \geq \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{2\lambda}} \quad \text{for } \lambda \geq 2. \quad (3.8)$$

We should remark that the continuity comes from Theorem 1.6 in Chapter VI of Liggett⁽⁶⁾ and the result by Bezuidenhout and Grimmett.⁽⁸⁾ Concerning the

monotonicity, it can be easily obtained, for example, see page 265 in Liggett.⁽⁶⁾ The lower bound on ρ_λ in Eq.(3.8) is nothing but the Holley-Liggett one on the survival probability. Moreover, Eq.(3.8) gives Holley-Liggett bound on the critical value:

$$\lambda_c \leq \lambda_c^{(HL)} = 2.$$

Therefore from the argument in this section we can obtain the following theorem:

Theorem 3.4. Assume that for any $m, n \geq 1$,

$$\nu_\lambda(\bullet) \nu_\lambda(\overbrace{\circ \dots \circ}^m \bullet \overbrace{\circ \dots \circ}^n) \leq \nu_\lambda(\overbrace{\circ \dots \circ}^m \bullet) \nu_\lambda(\overbrace{\circ \dots \circ}^n \bullet).$$

Then we have

$$\lambda_c \leq \lambda_c^{(HL)} = 2, \\ \rho_\lambda \geq \rho_\lambda^{(HL)} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{2\lambda}} \quad (\lambda \geq 2).$$

4 NUMERICAL RESULTS

The simulations were conducted as follows: particles, occupying sites of a lattice in one dimension, correspond to a distribution of 1's (particle) and 0's (empty site) on \mathbb{Z}^1 . At each step we take a particle, and either try to create another particle on a randomly chosen nearest neighboring site (with probability $p = \lambda/(\lambda + 1)$, succeeds if the neighboring site is empty) or remove the particle leaving an empty site (probability $1 - p = 1/(\lambda + 1)$).

The system size L was 10000 sites, with the initial configuration taken as all sites occupied. $4000 \cdot L$ steps were taken, the numbers of 01 (n_{01}), 10 (n_{10}), 010 (n_{010}) and 1 (n_1 , corresponds to the number of occupied sites) have been summed over the last $2000 \cdot L$ steps. We checked that for all p values considered after the initial $2000 \cdot L$ there are no systematic changes in the concentration of particles, indicating that the system is in a stationary state.

The results are plotted in 2 ways: as

$r_{010} \equiv (n_{01} \cdot n_{10}) / (n_{010} \cdot n_1)$ versus p (Fig.1), and as $d_{010} \equiv (n_{01} \cdot n_{10}) / (n_1 \cdot n_1) - n_{010} / n_1$ versus p (Fig.2).

Taking n_{01}/L as an approximation of $J(1, 0) = \nu_\lambda(\bullet \circ)$, and making similar assumptions for n_1, n_{01} and n_{10} one can write the statement of Conjecture 3.2 with $m = n = 1$ as

$$n_{010} \cdot n_1 \leq n_{01} \cdot n_{10},$$

which implies that $r_{010} \geq 1$ and $d_{010} \geq 0$.

When interpreting the graphs note, that because the density of empty sites is close to 0 for big enough p , the numbers of configurations involving 1's are low and the relative error is high, so that plots for r look rather bumpy as p approaches 1. Plots for d are much smoother, but hide some information, since for big enough p d approaches zero much faster than r .

Other combinations were treated in a similar way (Fig.1,2). No violations of the inequalities were detected, apart from the cases when non-compliance can clearly be attributed, to statistical error. For obvious symmetry considerations, configurations 0100 and 0010

should lead to the same r and p values, deviations in the graphs reflect the computational error involved.

Similar calculations were performed for the oriented site percolation, with p as the occupation probability. For oriented percolation the system size was 10000, 10000 steps were taken, with statistics summed over the last 5000 steps (Fig.3,4). For oriented percolation, similar conclusions as for basic contact process can be drawn, although at the moment we are unable to provide a theoretical explanation.

Note that for the basic contact the threshold point is at $p = 0.767324$ (Ref.⁽⁴⁾) while for oriented site percolation it is at $p = 0.705489$ (Ref.⁽⁹⁾), which defined the range of the p values used in the simulation.

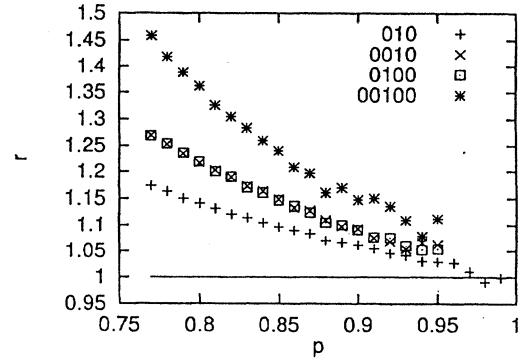


Fig 1. Basic contact process, r versus p . For 0100, 0010 and 00100 only points with $p \leq 0.95$ are shown, for bigger values of p the error is too big, so that data loses all meaning.

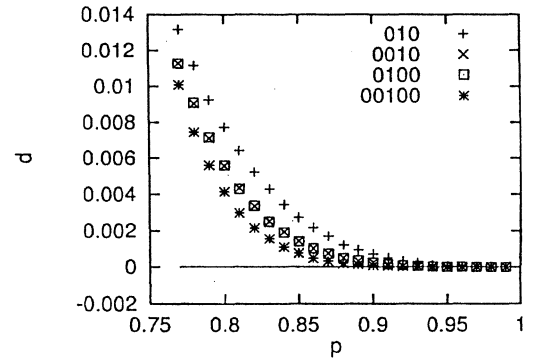


Fig 2. Basic contact process, d versus p .

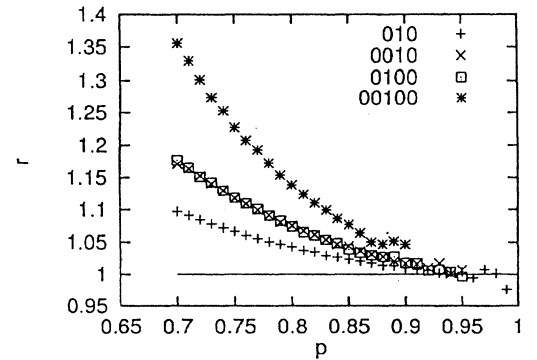
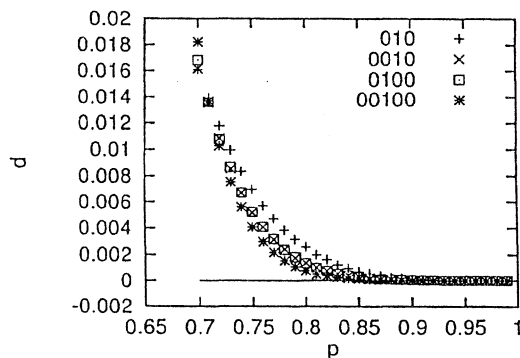


Fig 3. Oriented site percolation, r versus p . As in Fig.1 and Fig.3, for 0100, 0010 and 00100, points too close to $p = 1$ have a huge statistical error and have been omitted.

Fig 4. Oriented site percolation, d versus p .

5 CONCLUSIONS

In this paper we consider the correlation inequalities (Conjecture 3.2) which give the same bounds on critical value and survival probability for the one-dimensional basic contact process, as those derived by the Holley-Liggett method. Our results by Monte Carlo simulations suggest that Conjecture 3.2 holds for $(m, n) = (1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2)$. Moreover a similar conclusion is obtained in the case of oriented site percolation. The next stage could be to give a proof of Conjecture 3.2 for any $m, n \geq 1$.

REFERENCES

- (1) Holley R. and Liggett, T.M., Ann. Probab., Vol. 6, (1978), p198-206.
- (2) Harris, T.E., Ann.Probab., Vol. 4, (1976), p175-194.
- (3) Konno N., Phase Transitions of Interacting Particle Systems, (World Scientific, Singapore, 1994).
- (4) Jensen, I. and Dickman R., J.Stat.Phys., Vol. 71, (1993), p89-127.
- (5) Liggett, T.M., Probability and Phase Transition, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, edited by Grimmett G., (Kluwer, Cambridge, 1993) p209-226.
- (6) Liggett, T.M., Interacting Particle Systems, (Springer-Verlag, New York, 1985).
- (7) Belitsky, V., Ferrari, P.A., Konno, N. and Liggett, T.M., Stochastic Process. Appl., Vol. 67, (1998), p213-225.
- (8) Bezuidenhout, C. and Grimmett, G., Ann. Probab., Vol. 18, (1990), p1462-1482.
- (9) Onody, R.N. and Neves, U.P.C., J. Phys. A, Vol. 25, (1992), p6609-6615.

ホリー・リゲット法に対応する相関不等式の数値的評価

アレックス トレチャコフ*, ウラジミール ベリツキー**, 今野紀雄***, 山口 忠****

概要

ホリーとリゲットは、更新測度を用いることにより、1次元コンタクトプロセスの臨界値の上限と生存確率の下限を求めることに成功した。一方、同じ臨界値の上限と生存確率の下限を相関不等式のあるクラスを仮定することによって、ホリーとリゲットの証明に比べ、比較的容易に求められることが知られている。本論文では、上記相関不等式のクラスの代表的な幾つかの相関不等式に対し、モンテカルロ・シミュレーションによりその正当性を示した。

キーワード：相関不等式、コンタクトプロセス、臨界値、ホリー・リゲット法

*東北大学情報科学研究科、**サンパウロ大学数学統計研究所、***横浜国立大学工学部応用数学、****共通講座（数理科学）

フッサールの数理哲学(1) —「意味論的完全性」概念の不存在—

二宮公太郎

Husserl's Philosophy of Mathematics(1) —Non-Existence of the Notion 'Semantic Completeness'—

Kohtaroh NINOMIYA

(原稿受付日 平成10年5月8日 論文受理日 平成10年8月31日)

Abstract

We would think in this treatise over Husserl's theory of the 'definite multiplicity'. The 'definiteness' is interpreted generally in three different meanings. ——— D1: inextensibility. D2: decidability. D3: semantic completeness.

It should be insisted that D3 is not necessary. Husserl reduces the concept in mathematics 'true' to the 'proved-through-axioms', and the concept 'false' to the 'refuted-by-axioms'. Husserl has not any idea of the 'semantic completeness'.

Key words : definite multiplicity, semantic completeness
phenomenology, mathematics

1. 問題

本稿は、フッサールの「確定的多様体」論の一部を扱う。

「確定的多様体」の理念は、『プロレゴメナ』（『論理学研究』第一巻）にまず現われ、『イデーン』でも触れられ、『形式論理学と超越論的論理学』において明確に語られたもので、終生を通じたフッサールの思想であったが、この思想は、フッサールが『算術の哲学』を著わした頃の、極く初期の草稿の内において胚

胎したものであった。

フッサールの言う「多様体」は、〈無限個の対象——数——の領域〉と〈それらを扱う公理系〉とから成る。「確定的」とは、この公理系の理念的な性格を表わすフッサール固有の術語である。

フッサールアナ第12巻 340頁—500頁 には、数学の基礎付けを扱った10編の論文から成る未刊の草稿が、収められている。以後これを《数理哲学草稿》と呼ぶことにしよう。編集者のエリーによれば、第1論文から第4論文までは『算術の哲学』の第二巻のために準備されたようである。この草稿の内にある思想は、その基本的なものが『プロレゴメナ』およ

び『イデー』の内に現われているが、特に『形式論理学と超越論的論理学』の内には、草稿の具体的な表現を含めて、最も包括的に現われている。

「確定性」に関しては、R・シュミットが、フッサールの数理哲学に関する最もまとまった研究書である彼の著作 (Roger SCHMIT, *Husserls Philosophie der Mathematik*, 1981) の内で、この《数理哲学草稿》——特に、その第七論文「確定性と公理系の拡張とについての三つの研究」——の詳細で緻密な研究を通して、フッサールにおいて三つの意味を区別している (ibid., S.74-S.75)。すなわち

D1: 公理系の拡張不可能性

矛盾することなしに新しい公理を付け加えることができない。

D2: あらゆる命題(式)の決定可能性

公理系の言葉で理解され得る何れの命題(式)も、証明ないし反駁され得る。

D3: 公理系の意味論的完全性

真なる何れの命題(式)も、公理系の内で証明され得る。

の三つである。

シュミットはさらに、これら D1・D2・D3 をフッサールが同値と見なしている、と解する。

フッサールの数理哲学に関する研究文献で、この「確定性」の意味に或る程度詳しく言及したものは、日本には極めて少ない。

しかしそのうちでも、既に 渡辺二郎が『イデー』第一巻の翻訳において挿入した詳細な注 (『イデー I-II』1984年 みすず書房 376頁-380頁) が在る。その中で彼は、先の R・シュミットの著作からその解釈を引きつつ、シュミットがフッサールの内に読み取った三つの定義を紹介すると同時に、これに関わる幾つかの基本的な問題点を指摘している。

ただしここには、シュミットの言う D1 に関して誤解が在るように思われる。シュミットが言っているのは、公理系の「無矛盾性」のことではなく、公理系の「拡張不可能性」——当該の諸公理に矛盾することなしに新しい公理を付け加えることができない——のことである。

また、常俊宗三郎の研究 (『現象学の現在』1989年 世界思想社 46頁-68頁 所収) は、シュミットの同著作を前提した上で、「確定性」の意味に関して、「拡張不可能性」をも顧慮しつつ、基本的には「決定可能性」の問題を中心に理解すべきであることを示唆している。

フッサールの「確定的多様体」の理論は、数学の対象を虚数へまで拡大した場合に、無矛盾性を確保しながら公理系の「拡張」を行なうことが如何にして可能なのか、という問題関心が導いた理論である。それだけに、公理系の「拡張不可能性」がフッサールにとって極めて重要な概念である、ということは確かである。しかも、これと「決定可能性」との同値は、フッサールが幾つもの箇所で明言している。この「拡張不可能性」に関しては、S・バシュラールが、ヒルベルトの「モデルの拡張不可能性」の理論との比較を行なつてもいる (Suzanne BACHELARD, *A Study of Husserl's Formal and Transcendental Logic*, 1968 (*La logique de Husserl: Etudes sur "Logique formelle et logique transcendente"*, 1957), pp.60-63)。しかし、この比較の必要性や評価をも含めて、「拡張不可能性」に関する諸問題は、稿を更めて論ずることにしたい。

本稿は、「決定可能性」と「意味論的完全性」に関する限りで、フッサールがそれらの「同値」を主張しているとするシュミットの解釈を、問題とする。フッサールは決してこれらの「同値」を主張してはいないということ、それどころか 後者「意味論的完全性」の概念そのものがフッサールには存在しなかったということ、このことが、本稿で言わんとすることである。

2. 「意味論的完全性」の「主張」

シュミットが『形式論理学と超越論的論理学』中に参照を指示する (Schmit, op.cit., S.75, Anm.168) 箇所では、フッサールはこう述べている。

「一つの『ノモローギッシュな学』という理念には、……〈ノモローギッシュな学の『諸法則』の内に演繹的に含まれていないような、この領域にとって妥当する真理〉は存在しない、ということが属する……。」 (Husserliana, Bd.XVII, S.100)

と。

フッサールのこの表現は、「ノモローギッシュ——法則論的——な学においては、その内で理解される命題ないし式に関して、証明されず・しかも真なるものは存在しない」という意味である。これは確かに、「すべての真なる命題ないし式は、証明される」というのと同じことを意味する表現である。それは、「意味論的完全性」を表現したように見える。

そこでシュミットは、このフッサールの記述を、こうパラフレーズする (Schmit, op.cit., S.75)。

「或る公理系は、それが一つの規定された領域のあらゆる妥当な(真なる)諸定式を証明することを許すという場合に、その領域に関して完全である。」

と。そして、彼はこれを「確定性」の第三の「定義」とするのである (ibid.)。

3. 決定可能性との「同値」の「主張」

シュミットはさらに、フッサールが、この「意味論的完全性」を〈決定可能性〉と同値であると主張している、と解する。

シュミットは、《数理哲学草稿》の或る箇所を参照するように指示する (Schmit, op.cit., S.75, Anm.170)。フッサールはそこで、

「或る領域を境界づける一つの公理系は、次の場合に確定的であるという。それは、その公理系に基づいて理解し得るあらゆる命題が、すなわちその領域に関して把握されるあらゆる命題が、〈諸公理に基づいて真である〉か、または〈諸公理に基づいて偽である〉か、何れか一方である、という場合である。或いは他の表現をすれば、その命題が、〈諸公理から帰結する〉か、または〈諸公理に矛盾する〉か、ただ二様のことのみに可能である、という場合である。」 (Husserliana Bd. XII, S.457)

と述べている。

シュミット自身が『イデーネ』から引用する (ibid.) 箇所は、「同値」という語に関して、もっと明瞭である。

「一つの数学的-確定的な多様体においては、‘真’という概念と‘諸公理の形式論理的帰結’という概念とは、同値(äquivalent)である。また、‘偽’という概念と‘諸公理からの形式論理的な反帰結’という概念とも、同様[に同値]である。」

(Husserliana, Bd. III, S.157)

と、フッサール自身が記しているのだから。

4. 歴史的展開

〈決定可能〉ということに関しては、二つの意味を区別する必要がある。或る公理系に関してこの語が現代で普通に用いられる際には、それは、〈或る公理系において有意味な任意の命題ないし式——或いはその否定——が当の公理系の定理であるか否かを判定するための、一般的で機械的な手続きが存在する〉ということの意味する。いま、この意味での決定可能性を、「機械的」な意味での決定可能性と呼ぶことにしよう。しかし、この機械的な手続きが仮に存在しないとしても、そのことは、〈当の公理系において有意味ではあるが、しかし実際に証明ないし反駁し得ないような、何らかの命題ないし式〉が存在するということを、直ちに意味する訳ではない。機械的な判定手続きが存在するか否かということと、〈有意味な任意の命題ないし式が当の公理系において証明ないし反駁され得ることが、原理的に定まっている——この意味で「決定」されている——〉か否かということとは、別のことである。この後の意味での決定可能性を、「原理的」な意味での決定可能性と呼ぶことにしよう。「機械的」な意味で決定可能であれば、「原理的」にも決定可能であるということは、容易に理解される。しかし、「機械的」な決定が不可能であつても、「原理的」には決定可能であり得る。

シュミットは、〈決定可能性〉の定式化——彼の言う D2 ——において、フッサールの考える〈決定可能性〉が「機械的」な意味でのそれをも含んでいる、というふうに解釈しているようである。しかし、フッサールは、「確定的多様体」の〈理念〉を語っている。証明も反駁もされ得ないような命題ないし式が、公理系の内に存在しないこと、それが「確定的多様体」を規定するような公理系の〈理念〉である。この〈理念〉が目指すのは、「原理的」な意味での決定可能性のほずである。

シュミットが「意味論的完全性」と〈決定可能性〉との「同値」の主張を見た先の引用 (Husserliana, Bd. XII, S.457) の少し後で、この〈原理的な決定可能性〉を、フッサールは次のように表現している。

「次の規定は、先のものと同値である。すなわち、或る領域を有つ公理系は、その公理系が、この領域に関係付けられ・その公理系によって有意味であるような如何なる問題をも、開かれたままにしておかず、決定されないままにしておかない、そのような場合、確定的である。」 (Husserliana, Bd. XII, S.457)

と。ここでフッサールが言っているのは、有意味なあらゆる問題の〈解決可能性〉のことだが、これは、有意味なあらゆる命題ないし式の〈「原理的」な決定可能性〉と内容的に同じことなのである。

「機械的」な意味での決定可能性は、「原理的」な決定可能性を確認するためには、一つの方途ないし方法になり得る。「機械的」な判定を含めて、この「方法」一般をフッサールは、『形式論理学と超越論的論理学』の時点においても、ただ期待するだけではあった。

「ここへ、最高に意味深い諸問題が結ばれる。……或る公理系が一つの確定的な体系であり一つの‘完全な体系’であるということを、ひとは如何にして知ることができ、如何にして証明することができるのか？」(Husserliana, Bd. XVII, S. 100)

と。

このための判定手続きの存在に関する体系的な解明は、歴史的な展開を待たなければならない。現代論理学は「理念」を扱っている訳ではない。現実的で「技術」に長けた〈メタ論理〉こそが、それぞれの論理領域において、この「機械的」な決定可能性の存否を明らかにし得た。しかしまた、シュミットの解する通りに、フッサールが「意味論的完全性」と〈決定可能性〉との「同値」を主張しているとすれば、そしてまた、フッサールの考える〈決定可能性〉が、「機械的」な意味でのそれを含むものであったとすれば、その「主張」は、シュミットの言う通り、この歴史的な展開を通じて論駁された、ということにもなるだろう。

命題論理においては、任意の式がトートロジーであるか否かを判定するための機械的な手続きが存在する。また、トートロジーがすべて定理であること（意味論的完全性）——およびその逆——は、容易に示される。従ってまた、任意の式が定理であるか否かを決定するための機械的な手続きも、存在することになる。

一階述語論理においては、1930年にゲーデルが、すべての妥当式が定理であること（意味論的完全性）を示す。しかし1936年、チャーチによって、妥当式であるか否かを判定するための一般的な機械的手続きは存在しないということ、それゆえまた、述語論理の有意味な任意の式が定理であるか否かを一般的・機械的に決定することはできないということ、が示さ

れる。

これらのことから、意味論的完全性が「機械的」な意味での決定可能性を原理的に含意する訳ではないということもまた、示され得ることになる。

しかし、フッサールの言う〈決定可能〉が必ずしも「機械的」な意味でのそれを含むものではないとすれば、或いはむしろ「原理的」な意味に限られるものであるとすれば、これらの歴史的展開は、その限りでは、フッサールを「論駁」したことにはならない。

二階述語論理とそれに基づく自然数論においては、1931年にゲーデルが、有限の立場から成るメタ数学との関係においてではあるが、〈「自分自身は証明できない」〉ということの意味し、しかも実際、自然数論の公理系の内では証明も反駁もすることができない、或る式〉を、自然数論の公理系の内に「構成」して見せる。この式は、その存在によって既に、二階述語論理 およびそれに基づく自然数論の〈決定可能性〉を否定している。この式はさらに、それが或る意味で「真」として解されるならば、同時にこの体系の意味論的「不完全性」を示すものとしてもまた、見られることになる。そして、決定可能性と意味論的完全性とのいずれもが成立しないところでは、それらの間の「同値」を語ることも、意味の無いことになるだろう。

フッサールが〈決定可能〉に関して「論駁」されることが在り得るとすれば、ここにおいてである。

『形式論理学と超越論的論理学』の直後に現われた、このゲーデルの「不完全性定理」は、まさにフッサールの意味での「原理的」な決定可能性の「理念」に対して、「有限主義」のメタ数学との関係においてではあるが、それが達成不可能であることを証示するという意味を有っている、からである。

しかし、フッサールがゲーデルの「不完全性定理」に答えた形跡は、その後の彼の著作のうちの何処にも見いだされない。フッサールは、なぜこれに答えないのか？ 或いは、答える意思が在ったとすれば、推測される答えは如何なるものなのか？ これらのことは、稿を更めて検討すべき問題である。

さて、いずれにせよ、我々の関心は、フッサールが〈決定可能性〉を「意味論的完全性」と「同値」であると考えているとする、シュミットの解釈を巡ってである。

フッサールの考える〈決定可能性〉が「原理的」な

ものに限られるとすれば、シュミットがフッサールから「同値」の主張を読み取る二つのもののうち、一方が、その意味の重要なものを失う。しかし、このことは、本稿の主題ではない。

これに対して、フッサール自身が「意味論的完全性」の概念そのものを有っていなかったとすれば、シュミットが「同値」の主張を読み取る二つのもののうち、もう一方は、その存在を失う。本稿の主題は、こちらの方に在る。

5. シンタクスとセマンティクスとの「混同」か？

フッサールは確かに、「証明」や「定理」といったことが関わる決定可能性の文脈の内、すなわちシンタクスを問題とする文脈の内に、「真」ないし「偽」という語、すなわちセマンティクスの術語を、ときとして用いる。

シュミットは、彼が先に「意味論的完全性」をフッサールの内に読み取った『形式論理学と超越論的論理学』における箇所 (Husserliana, Bd. XVII, S. 100) の少し後に、次の記述を指摘している (Schmit, op.cit. S. 74)。

「このような多様体を形式的に定義する一つの公理系は、次のことによって際立たせられる。それは、この公理系の内に登場する諸概念（もちろん概念諸形式）から純粋に論理的・文法的に構成され得る何れの命題（命題形式）も、‘真’すなわち諸公理の分析的（純粋に演繹的）な一帰結であるか、或いは‘偽’すなわち分析的な一矛盾であるか、いずれか一方であるということ、すなわち、第三のものは与えられないということ、である。」

(Husserliana, Bd. XVII, S. 100)

このような表現を以って、フッサールの内に「シンタクスとセマンティクスとの混同」を指摘する、S・バachelardのような見かた (S. Bachelard, op.cit., p. 60) も出てくることになる。しかし、それは全く的外れである。

しかしまた、シュミットのように、この表現の裏面に「意味論的完全性」とく決定可能性との「同値」の主張を読み取ろうとする (Schmit, op.cit., S. 75) のも、やはり的外れである。

シンタクスの場面に「真」とか「偽」とかの語がたまたま混入するのは、一つの理論にとって、それほど

致命的な問題になる訳ではない。既に我々は、命題論理の記号を定義するのに真理値表を用いるといったことで、このことに慣れている。フッサールにおける「混入」も、これと本質的に異なるものではない。重要なことは、「真」とか「偽」とかという語をシンタクスの場面で用いる際に、それらをシンタクスの内にどのように位置づけるか、或いは別の言い方をすれば、それらにシンタクスの上でどのような役割を有たせるか、ということである。

「混同」や「同値」どころか、このような表現は、全く別の重要な意味を有っている。

6. 「諸公理に基づいて……」という表現

シュミットが〈決定可能性〉と「意味論的完全性」との「同値」の主張と見た《数理哲学草稿》からの先の引用 (Husserliana, Bd. XII, S. 457) の中に在る、「諸公理に基づいて真」および「諸公理に基づいて偽」という表現に、注意する必要がある。もう一度見てみよう。

「或る領域を境界づける一つの公理系は、次の場合に確定的であるという。それは、その公理系に基づいて理解し得るあらゆる命題が、すなわちその領域に関して把握されるあらゆる命題が、〈諸公理に基づいて真(aufgrund der Axiome wahr)である〉か、または〈諸公理に基づいて偽(aufgrund derselben falsch)である〉か、何れか一方である、という場合である。或いは他の表現をすれば、その命題が、〈諸公理から帰結する〉か、または〈諸公理に矛盾する〉か、ただ二様のことのみが可能である、という場合である。」

(Husserliana Bd. XII, S. 457)

というものである。

「混同」が問題とされた先の引用もそうであったが、ここでも、主旨は〈決定可能性〉についてである。その文脈の内では我々は、「他の表現をすれば」という記述から、シュミットらのように「同値」を云々するよりも前に、〈証明されること〉とく反駁されることへの、それぞれ「諸公理に基づいて真」と「諸公理に基づいて偽」との、単なる言い換えを、読み取る必要が在る。その際に、「真」や「偽」には、「諸公理に基づいて」という限定が付せられているということに、注意しなければならない。ここで言われている「真」や「偽」は、公理系の言わば「外」から、それだけで独自に定まるような「真」や「偽」なのでは、

初めからない。

この「諸公理に基づいて」という表現は、数理哲学の草稿の内には、フッサールが〈決定可能性〉を語る際に、繰り返し現われる表現である。

フッサールは、確定的な——決定可能な——公理系に関して、こう記す。

「いま、Sが一つの命題で、それが「[公理系]Aによって現実存在するものとして証明された多様体にとって、Sは妥当する」ということを述べ立てているとすれば、この命題は、この多様体にとって、Aに基づいて「真」であるか、或いはAに基づいて「偽」であるか、いずれか一方である。」

(Husserliana, Bd. XII, S. 454)

と。フッサールはここでは、〈証明される〉とか〈反駁される〉とかの表現を用いずに、まさにこれらに替えて、「[公理系]Aに基づいて真」とか「[公理系]Aに基づいて偽」とかという表現を、直接に用いている。

もう一つ見てみよう。

「一つの確定的な公理系は、その操作諸基体に対して、定義された諸操作に関して、全く何ひとつをも開かれたままにしておかない。仮に、その公理系が何かを開かれたままにしておくとしたならば、諸公理に基づいて「真」とか「偽」とかであるのではないような諸関係が、まさに存在することになるであろう。」(Husserliana, Bd. XII, S. 456)

ここで「開かれたまま」とフッサールが記しているのは、或る式について、それが〈「証明」も「反駁」もされない〉ということの意味する。すなわち、ここでは、公理系が確定的ではない——決定可能ではない——一場合が、問題とされている。そして彼は、まさにこの「証明も反駁もされない」という内容を表現するのに、「諸公理に基づいて真とか偽とかであるのではない」という言い方を以ってしているのである。

これら三つの引用は、すべて〈決定可能性〉に関わっている。次の引用の内では、この〈決定〉のことを、「諸公理を通して」という語とともに、「真」および「偽」という語を以って、直接に表現している。

「一つのこのような[拡張不可能な]操作体系は、次の意味においても確定的である。すなわち、如何なる命題にとっても、それが当該の領域に当てはまるか否かが、いまや見て取られ得る、とい

う意味においてである。その命題は、およそ、操作記号と関係記号を含み、かつそれらを有意味に結合する、ということが必要であるが、しかしそれだけでよい。或る命題が、諸公理に適合して意味を有つならば、その命題は、諸公理を通して真と偽とへと決定されて(entschieden)いる。」

(Husserliana, Bd. XII, S. 455)

と。

「言い換え」であるのならば、「諸公理に基づいて」等の限定が付せられたとしても、これら「真」や「偽」は、固有の術語としては、実は不要なものでもある。しかし、不要であるということそれ自体の重要さを、見逃してはならない。

数学においては、〈証明〉や〈反駁〉を離れて「真」「偽」を語ることは、意味の無いことである。数学における「真」を〈証明されること〉に解消し、「偽」を〈反駁されること〉に解消すること——フッサールがシンタクスの文脈の内に「真」や「偽」の語を用いることの狙いは、実はここに在る。フッサールの、「諸公理に基づいて」ないし「諸公理を通して」という限定を付した上での「真」とか「偽」とかの語は、このような彼の意図が自ずと採らせる表現なのである。

ところが、このような限定の付せられた「真」とか「偽」とかは、公理系を離れては存在し得ない。このことは同時に、フッサールにおいては「意味論的完全性」という概念そのものが存在しない、ということの意味する。この概念は、公理系とは無関係に或る命題ないし式の「真」が定まることを前提として、そのような「真」なる命題ないし式のすべてが、或る特定の公理系において証明される、ということの意味する概念である、からである。すなわち、シュミットがフッサールの「確定性」概念の内に読み取った三つの意味のうち、第三のものは、実はフッサールには存在しないのである。

7. 「真」「偽」の定義

既に引用したフッサールによる二つの記述を再び参照しながら、フッサール自身の内にどのような論理が働いているのかを探ってみよう。

『イデーネ』では、フッサールはこう言う。

「一つの数学的-確定的な多様体においては、「真」

という概念と「諸公理の形式論理的帰結」という概念とは、同値である。また、「偽」という概念と「諸公理からの形式論理的な反-帰結[矛盾]」という概念とも、同様〔に同値〕である。」

(Husserliana, Bd. III, S. 157)

と。ここでは、公理系が確定的である場合——あらゆる有意味な式が決定可能である場合——について、「証明される」とことと「真」との「同値」が、また「反駁される」とことと「偽」との「同値」が、それぞれ語られている。

《数理哲学草稿》には、フッサールはこう記していた。

「仮に、その公理系が何かを開かれたままにしておくとしたならば、諸公理に基づいて「真」とか「偽」とかであるのではないような諸関係が、まさに存在することになるであろう。」(Husserliana, Bd. XII, S. 456)

と。ここでは、公理系が確定的でない——決定可能でない——場合に関して、彼固有の限定が付せられた限りでの「真」でも「偽」でもない式が存在する、とフッサールは考えていることになる。

無限個の有意味な式について、原理的にそれらは、証明されるかされないかのいずれかであり、また、反駁されるかされないかのいずれかである。いま諸公理の「真」を前提した上で、証明される場合を「真」と呼び、反駁される場合を「偽」と呼ぶことは、数学においても意味の在ることである。更に、直前の二つの引用のうち後のものが要求する厳格さの内では、証明されない限りは「真」と呼ぶことはできず、また反駁されない限りは「偽」と呼ぶことはできない、と考えられなければならない。実は、数学における「真」という語と「偽」という語との用法をこのように定めること、このことこそ、フッサールが「諸公理に基づいて真」とか「諸公理に基づいて偽」とかという表現を用いる際に、彼が考えていることなのである。

その上で、いま原理的な諸場合の区別を明確にするために、或る公理系 A を考えた場合、そこにおける有意味な式 x について、「証明される」ことを $B_A x$ と表示し、「真」を W_A と、「偽」を F_A と表示して、これらを整理すれば、次のようになるだろう。

- ① $B_A x \rightarrow W_A x$
- ② $\sim B_A x \rightarrow \sim W_A x$
- ③ $\sim B_A \sim x \rightarrow \sim F_A x$

$$\textcircled{4} \quad B_A \sim x \rightarrow F_A x$$

ここで、「反駁される」とは、「否定が証明される」という意味であること、また、「真ではない」ことが直ちに「偽」であることにはならず、同様に「偽ではない」ことが直ちに「真」であることにはならない、ということに、注意されたい。

ところで、直前の二つのうち先の引用の内で、〈公理系が確定的——決定可能——な場合には、証明されることと真とが同値であり、反駁されることと偽とが同値である〉とフッサールが言うのは、どういう意味であろうか。

上の①～④は、用語のシステムを決めるものであるから、すべてが連言で成立している。我々は容易に、①と②から「証明されることと真との同値」を導くことができ、③と④から「反駁されることと偽との同値」を導くことができる。しかし、この意味での「同値」ならば、公理系が決定可能ではなくとも、成立していることになる。この限りでは、これらの関係を我々は、「同値」というよりは、むしろ「同義」と呼ぶべきであろう。特に公理系が確定的——決定可能——な場合に限ってフッサールが「同値」を語るのは、公理系が決定可能ではない場合との間で、或る意味での対比を彼がしている、からである。

8. 公理系が確定的である場合 ————— 「意味論的完全性」の外観を含む、 〈証明される〉ことと〈真〉との「同値」

①～④の諸場合から各々の前件のみに着目し、証明されるか否か、反駁されるか否か、に従って、それらを機械的に組み合わせれば、四通りの排他的選言が形式的には可能である。しかし、いま我々は、公理系の〈無矛盾性〉については特に問題とせず、これを前提している。このことのもとでは、証明されれば反駁されることはなく、また、反駁されれば証明されることはない。結局、実際に成立するのは、

- a. 証明される
- b. 証明も反駁もされない
- c. 反駁される

の三通りの排他的選言である。

「決定可能」は、〈理念〉のうちでこそ、成り立ち得る事態である。フッサールが無限の対象について「排中律」を適用しているように見えることがしばしば

ば在るのは、フッサールがこの「理念」を語っているからである。

決定可能とは、任意の有意意味な式について、「証明される」ことと「反駁される」こととの二者の間でのみ選言が成立する、ということである。この確定性の〈理念〉の内では、「中間」bが排除される。このことのもとに、先の①④を通して、我々は、或る公理系Aに関して、

$$a. \quad B_A x \quad \rightarrow \quad W_A x$$

$$c. \quad B_A \sim x \quad \rightarrow \quad F_A x$$

という二通りのみの含意関係を、両前件どうしの（排他的）選言と共に、連言として得ることになる。そして、〈決定可能な場合に固有の意味での、証明されることと真との「同値」、反駁されることと偽との「同値」〉は、まさにこのことの効果に他ならない。

公理系が決定可能であるという前提のもとで、〈真であるが証明されない式〉が存在する」ということを仮定してみよう。

この存在が仮定された式は、決定可能という前提のもとでは、証明されない以上、〈反駁される〉ことになる。

そして、一般に——決定可能であるか否かに拘らず、語の定義に従って——、或る式が反駁されるならば、その式は〈偽である〉。

ところが、同様に一般に、真と偽とは、初めから排他的に設定されている。「真」という述語は、或る式 x とその否定 $\sim x$ とのいずれにも付せられるような述語なのではない。同時に、 x が「偽」であるとは、その否定 $\sim x$ が「真」であることに他ならない、ということに注意されなければならない。この問題の式は、その否定に「真」という述語が付せられる以上、それ自身に「真」という述語を要求することはできない。すなわち、存在が仮定された当該の式は、〈真ではない〉。

こうして、問題の式は、真であると同時に真ではない。これは矛盾であるから、仮定された「真であるが証明されない式が存在する」ことの否定、すなわち、「任意の有意意味な式について、真であれば証明される」ことが妥当する。

他方、任意の有意意味な式について「証明されれば真である」ことは、「真」の言わば定義である。公理系が決定可能である場合に固有の、〈証明される〉ことと〈真〉との「同値」は、こうして容易に示される。

同様にして、公理系が決定可能である場合の、「反駁される」ことと「偽」との「同値」もまた、示されることになる。

この簡単な「証明」中に現われた〈「仮定」の否定〉は、そのまま表現すれば、「真であって証明されない式は存在しない」ということになる。この表現こそ、シュミットがフッサールの内に「意味論的完全性」の主張を読み取った『形式論理学と超越論的論理学』からの先の引用（Husserliana, Bd. XVII, S. 100）の中で、フッサールがまさに用いた表現である。

しかし、フッサールの言う「真」は、既に見てきたように、諸公理によって「証明」されることから独立に定まるような「真」なのでは、初めからない。あたかも「意味論的完全性」を表現しているかの如き外観が、シュミットに誤解を生じさせる。しかし、「意味論的完全性」に関わる問題を考える必要は、我々には全く無いのである。

そして、そうである以上、この「意味論的完全性」に関して、〈決定可能性〉との間に、現代論理学が言う意味での「同値」をフッサールから読み取る、という必要もまた、全く無いということになるであろう。

9. 公理系が確定的でない場合 ————— 「外観」の根拠をフッサールの内に探る。

シュミットが「意味論的完全性」を読み取るのは、「真」が、フッサールにおいても、あたかも公理系の「外」から定まるかの如き印象が、一般に与えられるからである。しかし、シュミットのように主張するためには、それが単なる印象ではなく、フッサール自身の内にその根拠が存在する、ということを示すことが必要であろう。

そうは言っても、この「根拠」をフッサールから引き出すのは容易なことではない。「真」を「証明されること」に還元しようとするフッサールの基本的な考え方に矛盾することなく、それは如何に可能であろうか？

この「根拠」は、フッサール自身が明言していない以上、我々が推測するしかない。そして、このことの中で、シュミットが「意味論的完全性」およびそれと〈決定可能性〉との「同値」をフッサールから読み取るようになることの原因もまた、明らかとなるであ

ろう。

そのために我々は、公理系が確定的でない場合、を考えてみよう。

或る公理系Aが確定的ではない——決定可能でない——場合には、先の「中間」b が存在し、従って〈証明も反駁もされない式〉が、少なくとも一個は存在する。

それでも、真偽は「いずれか」に定まるはずである、真偽は それらのうち「いずれかである」、——フッサールには、おそらくこの考え方が在ったはずである。フッサールは、こう記している。

「数の算術にとっては、諸々の数の間のあらゆる関係が、真か偽かの何れかであるということは、自明のことである。」(Husserliana, Bd. XII, S. 463) と。それは、真偽に関する一種の「排中律」であるようにも見える。

ところが、真と偽とは「いずれかである」としても、その「いずれであるか」は、また別の問題である。当該の公理系において証明も反駁もされない式について、その真偽の「いずれであるか」は、如何にして定まるのか？

「諸公理に基づいて真」という表現 —— これは、数学における「真」を、あくまでも諸公理からの証明に基づかせようとする、フッサールの基本的な考え方を示す表現である。フッサールにとって、数学における「真」が、諸公理からの「証明」を離れて成立するという事はない。

フッサールは、いまの場面でも、この原則を貫くであろう。当該の確定的ではない公理系Aの内に現われた問題の〈証明も反駁もされない式〉の「真」は、従って、この公理系が「拡張」され、新たに付け加えられた公理を含めた 新しい公理系A'によって定まるのでなければならないだろう。

新しい公理は、当該の式 x が、証明されるか反駁されるか何れかであるようにして、付け加えられる。証明されるように付け加えられれば、この式 x は、「諸公理に基づいて」という定義の内において、それ自身が「真」となり、反駁されるように付け加えられれば、それ自身は「偽」、すなわち、その否定 $\sim x$ が「真」、となる。

我々はいま、「諸公理からの証明」のみが「真」の

基準であるという、フッサール固有の論理の内にいる。

〈証明・反駁されない式〉も、真か偽かの「いずれかである」。——それは、真偽の「排中律」のように見える考え方であった。しかし、その「いずれであるか」は、新しい公理が付け加えられることによって初めて定まることになる。一見「排中律」の単純な適用のように見える考え方も、実は、公理系の「拡張」と「確定」化を導く、一つの指導理念に他ならないものであることが分かる。それは、「真・偽は、何れかに定まらなければならない」という〈シンタクスを超えた、或いは別の表現をすれば、シンタクスを包み込む、一般的な要請ないし「当為」〉に従った、論理全体を貫く一つの指導理念として、考えられるべきものである。

「真」が定まるのに、新しい公理が付け加わることを通して、とは、当該の公理系の「外」から、ということをもさに意味する。不確定な公理系について、〈新しい公理系A'で「真」であるが、当該の公理系Aで証明されない、そういう式〉が在る、というふうに言うことは、新旧二つの公理系にまたがった論理を立てることではある。しかし、「真」が「諸公理に基づいて」定まるというフッサールの基本的な考え方を前提する限り、当該の公理系の「外」から「真」が定まるという構造は、おそらくこのようにしてしか現われないだろう。

この構造、ないしそれが現われてくる過程、さらにはこの構造の内引き出され得る次のような諸帰結、等を詳しく示すことは、紙幅の都合から、機会が在る限りで別稿にゆだねざるを得ない。

ともかく、この構造の内では、シュミットがフッサールから望むのと同じ——或る一つ意味においてだが同じ——諸結論が、容易に引き出され得る。

公理系Aが〈確定的——決定可能——である〉場合、フッサールによればAは「拡張」することができないから、A'は実質的にはAと同一であり、また、A'における「真」は、実質的にはAにおける「真」がそのまま移し込まれたものである。しかし、この場合を、この構造における一つの特例的な事例として見て取ることは、おそらく可能であろう。この限りで、この場合における「真と証明されることとの同値」は、見かけの上では、「真」が当該の公理系Aの「外」から定まるという前提のもとで、成立することができるだろう。

〈決定可能性〉と「意味論的完全性」との「同値」に関しても同様である。すなわち

先の「真と証明されることとの同値」における一方の含意関係は、まさに「意味論的完全性」を意味する。そして、公理系が〈決定可能である〉という前提のもとでのこの「意味論的完全性」は、同時に、求められている「同値」に必要な一方の含意関係を構成する。

他方、公理系が〈決定可能でない〉場合には「真であつて証明されない式が存在する」ということも、直ちに明らかである。このことの対偶は、「同値」に必要な他方の含意関係を構成する。

しかし、これらすべてが我々の推測に基づくということ、「公理系が確定的でない場合に、真と証明されることとは同値ではない」とは断言せず、この表現をフッサールが注意深く避けているということに、我々は注意しなければならない。この「構造」をフッサールから読み取ることには、我々は慎重でなければならないだろう。

10. 結語

フッサールの基本的な考え方を要約しよう。

諸公理の「真」を前提した上で、有意味な式について、「真」を諸公理から「証明される」ことに還元し、「偽」を諸公理によって「反駁される」ことに還元すること、或いは、そのように「定義」すること、——このことこそ、「諸公理に基づいて……」という表現によって、フッサールが考えていることであつた。

フッサールは、命題論理の場合に典型的のように任意の命題ないし式について証明を離れて「恒に真」が先に分かるといった事態を、想定している訳ではない。証明を離れた「真」という概念は、フッサールには存在しない。従つてまた、これを前提した上で、それらの命題ないし式が或る特定の公理系の諸公理から証明され得るか否かを問題とするといった、いわゆる「意味論的完全性」の問題も、フッサールにおいては生ずる余地がない。それどころか、現代論理学に固有な意味での「セマンティクス」そのものが、実はフッサールには存在しないのだと言ってもよいのである。

フッサールのこのような行き方を、一方ではヒルベルト的な「意味抜き」に対比してみることに、他方では直観主義の有つ「真」概念に対比してみることに、——

——— これらは、極めて興味のそそられる課題ではある。しかし、これらを行なうことは、現在の筆者の手には、遺憾ながら余る。

フッサールがこのような「真」「偽」概念を導入するのは、これを以つて「無矛盾性の論理学」における形式的な意味での真理概念を特徴付け、これを、「超越論的論理学」における実質的な意味での真理概念に對置する、というためであろう。

この後者こそが実は、フッサールにとって「セマンティクス」の成立する場所である。そしてここでは、先の「諸公理に基づいて……」に替わつて、「諸知覚に基づいて……」という仕方における真偽の決定が、まさに妥当するであろう。実質的な「意味」を有つたあらゆる命題は、明証性の原的な体験である諸々の知覚に、その真偽が究極的に掛かっているのだから。

しかし、「諸公理に基づいて……」という形式的真理の特徴付けの意味は、ただ単にそれだけではない。それは、フッサール現象学の重層的な構造全体に関わることでもある。

「形式的存在論」は、あらゆる「実質的な存在論」に妥当し、これらを貫くものでなければならない。言い換えると、それは、実質的な真理の基礎的な枠組みそのものを支えるものでなければならない。フッサールにとって、形式的な意味での「真」は、実質的な諸学の「真」を支える枠組みそのものの「真」として、要請されなければならないものなのである。

公理系は、もともと「真」「偽」の概念を全く欠いたままで立派に成立すべきものである。しかし、もともと、その公理系の全体を導く諸公理を「真」として設定すること、さらには、それらから導出される「定理」を含めた公理系全体に「真」の性格を有たせること、それは、我々の思惟の正当性を我々自身が要求することが、我々をしてそれに向かわしめることである。我々の思惟は「正しい」ものでなければならない——

——— この一般的で或る意味では素朴な要請の内にこそ、我々が「真」概念を以つてシンタクスに言わば介入することの根拠が在るのだ、と言えるだろう。

(にのみや こうたろう・哲学)

補助動詞「やる」の基底に存在する認識について

松本 敏治*, 塩谷 亨*

Cognition underling converb "yaru" in Japanese

Toshiharu MATSUMOTO and Toru SHIONOYA

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

Two kinds of usage are found in the dictionaries on the converb "yaru", i.e., (i) expression of benefactive action to others, and (ii) expression of negative feeling. The usage (ii) seems to be contradictory to the usage (i). The present paper analyzes the recognition behind the usages of the converb "yaru" and attempts to establish a generalization which cover both of two usage. The converb "yaru" shows the speaker recognizes (i) that there is a conflict, (ii) that the actor can solve CONFLICT, and (iii) that the actor has CONTROLLABILITY. It also explains how the usage of "yaru" affect the rank of the persons concerned, and the usage of other benefactive converbs such as "kureru" and "morau".

Key words : converb "yaru", conflict, controllability, speaker's recognition

1. 序

発話において特定の言語表現が選ばれるのは、単純に客観的状況にのみ依存するのではなく話者の認識、意図、感情などのさまざまな話者側の要因による。話者は、自らの認識、意図、感情を表現するための適切な言語表現をボキャブラリーの中から探し出そうとする。時には、適切な表現を探し出すことも出来る。だが、時には、自らの思いを表現出来ないもどかしさにとらわれる。一方、聞き手は言語表現の中に話者の認識を読みとる。話者が使用したことばや言い回しの中から話者がどのような認識、意図、感情を持っているかを理解しようとする。この場合にも時には適切に読みとることも出来るが、時に読み違いが生じる。言語は、厳密に事実を伝えるとともに、話者の認識、意図、感情を伝える。

本稿の目的は、話者が使用する語と認識・意図・感情の関連、および聞き手による話者の認識・意図・感情の推論のメカニズムを明らかにする事である。具体的には、言語表現が認識・意図・感情と結びついている側面を表す一例として補助動詞「やる」について分析を行う。事実についての表現は本動詞においてなされるので、補助動詞「やる」は話者の認識、意図、感情と結びつく可能性が高く、また、分析の場面で出てくるように、非常にドラマチックな場面において利用されることなどから、話者の認識、意図、感情を分析するのに適切と思われたためである。

1.1 補助動詞「やる」の辞書的定義

補助動詞「やる」について辞書はつぎのように定義している。

広辞苑 第4版

1. 同等以下のもののために労を執り、恩恵を与える意を表す。狂、三人片輪「いかにも、かかえて-ろう」「読んで-ろう」

* 共通講座

2. 相手に不利益を与える意を表す。「殺してー・る」「家でして・る」

三省堂 大辞林

1. 何らかの動作を他に対して行う意を表す。「紹介状を書いてー・る」「本を読んでー・る」

2. 話し相手が強い気持ちで投げやりに言い放つ意を表す。「手紙の返事を書かないで、ほうっておいてー・った」

講談社 日本語大辞典

1. 他のために．．．する。「用いてー。」

2. 怒り、憎しみの気持ちで相手に接する。「怒ってー。」

3. やけになって、する。「あてつけに死んでー。」

これらの定義は、大きく二つの意味に分けられる。一つは、他者への恩恵・利益を与えることを意味する場合で、他方は、他者への否定的感情の表出を意味する場合である。他者への恩恵・利益を与える意味に対応する定義としては、広辞苑の1、日本語大辞典の1が含まれる。また大辞林の「何らかの動作を他に対しておこなう」とするものも、その用例から見て、この意味の範囲に含まれると考えられる。多者への否定的感情の表出に対応する定義は、広辞苑の2、大辞林の2、そして日本語大辞典の2、3が対応する。このように辞書では、「やる」は、一方で他者への恩恵・利益、他方で他者への否定的感情の表出というまったく対極的な意味を有しているように見える。

1.2 「やる」についての言語学的分析

「やる」についてその恩恵・利益の側面からなされた言語学的分析として金田一春彦^①などがあり、他方、話者の視点や立場に基づく分析として久野^②、宮地^③らの分析がある。

久野^②は受益補助動詞の用法は話し手の視点の問題であるとして、「やる」が用いられるのは、話し手の視点が非主語よりも主語よりである場合と分析している。宮地^③は受益補助動詞に関して、文の主語、話し手の立つ側、実際の行為の主体、「やる」の主体の計4つの要素の相関関係としてとらえ、「やる」が用いられるのはこれらすべてが一致している場合であると分析している。話者の視点、あるいは話者の立場という要素に着目したこれら2つの分析は、他の受益補助動詞を含めた体系化に有益なものである。しかし、彼等の分析は、「やる」「もらう」「くれる」などの受益動詞全体に対するものであるため、上述の第二の意味、否定的感情の表出についての問題は中心的議論とは成り得ていない。つまり、第二の意味についての分析も、第一の意味と第二の意味の関連についての議論もなされているとは言えない。また、久野^②、宮地^③の分析はどちらかといえば、文法的なものであり、従って、本稿で扱うような問題、すなわち、実際の補助動詞「やる」の否定的感情表出のメカニズムについて言及し得ない。

分析を始めるに当たって、本稿では恩恵・利益を表す場合を「やる¹」、否定的感情の表出の場合を「やる²」と

便宜的に表現することとする。

2. 「やる」についての分析

2.1 恩恵・利益を表明する時に使われる「やる¹」について

恩恵・利益を表す時に使われる「やる」の場合、誰かが他者の利益のために何かを行う状況を記述するものと見なされる。

ゆえに、これらの動詞を含む文章では、「誰々のために」という句を明示的あるいは暗示的に含んでいることとなる。たとえば、

1 (彼女のために) 僕が本を読んでやる。

などである。しかしこの際、行為者と恩恵を受ける人物が同一であることは許されない。

2 *(僕のために) 僕が本を読んでやる。

という文章は不自然であり、この場合は、動詞を「読む」と変えることでより自然な表現となる。

3 (僕のために) 僕が本を読む。

つまり、「やる¹」は、行為者と利益あるいは恩恵をうけるもの(受益者)が同一ではないことを示唆している事となる。

また話者と行為者は同一であっても、別人であっても構わない。

4 (彼女のために) 彼が本を読んでやる。

という文は問題がない。

また話者と受益者は同一であってはならない。

5 *(僕のために) 彼女が本を読んでやる。

は不自然な文であり、この場合は

6 (僕のために) 彼女が本を読んでもくれる。

あるいは

7 (僕のために) 彼女に本を読んでもらう。

となる。

ゆえに、話者・行為者・受益者については、行為者と受益者が同一ではない、また、受益者が話者ではないという制限が存在する(Fig. 1)。

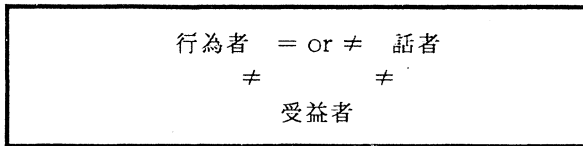


Fig. 1 「やる¹」における行為者、話者、受益者の関係

2.2 否定的感情の表出の際に使われる「やる²」について

しかしながら、「やる」には、行為者が他者に恩恵や利益を及ぼさない状況で使われる事例が存在している。たとえば

8 殺してやる

という文を考えてみよう。短い文であるため、状況によって意味合いは変化するが、ここでは次のような状況において発せられた場合を考える。二人の人物の間になんらかの諍いが生じ、一方の人物が怒りにかられ8の文を口走った。「やる」動詞が受益補助動詞であるとする何者かがこの行為によって恩恵あるいは利益を受けなければならない。つまり

9 (誰々のために)殺してやる

という意味を持つはずである。この場合、第三者はこの場面に介在していないので、受益者/恩恵者は二人の当事者のうち一方でなければならない。殺してやると叫ばれた相手(聞き手)は、殺されるという自己にとってもっとも不利益な行為の対象であるから受益者とは見なし得ない。となれば、行為者でもある話者が受益者となる。だが先にのべたように「やる」動詞は、受益者と行為者は別な人物であることを示唆している。

- 10 a.*(私のために)(私が)殺してやる。
b.(私のために)(私が)殺す。

上の2つの文を比較した場合、Bがより自然な文章と見なされる。このように受益者が明白でない事例は、「やる」の受益補助動詞としての説明を受け入れない。

2.3 外部起因

では、このような「やる²」についてどのような解釈が可能であるのか。ここでは、次のような状況下の「やる」について分析を進める。

- 1.他人の利益・恩恵とならない。
- 2.(典型的には)言い切り。
- 3.宣言

たとえば、上述のような状況での「(職場や学校を)や

めてやる」「死んでやる」「殺してやる」「(試験に)受かってやる」「金メダルをとってやる」などである。

最初に結論をのべるなら、これらの場合の「やる²」は、話者がその行為を行うに至る原因の一部を外部に求め、一方、行為を行うか否かの決定が行為者自身の意志と能力によっていることを示す場合に用いられる。

11 (学校を)やめてやる

では、行為の採否は最終的に学生が決定したにしても、学生はそのような行為に至らせた原因の一端が外部に存在すると見なしていることを示唆する。この際、その原因の一端が客観的に教官や大学に帰属するか否かは問題ではない。学生が、そこに原因を見いだしていることが重要なのである。

このことは、この発話を聞く第三者を想定することで検証できる。学生が教官に向かって上述のような発言をしたとする。側でそれを聞いた第三者は、学生の発言を聞いただけで、学生がやめるという発言をした原因の一端が教官あるいは大学組織にあることを容易に推測できる。また、学友にむかって「(学校を)やめてやる」という宣言をおこなった場合でも、同様にその発言の原因の一端が話者である学生の外部に存在することを推測できる。

2.4 コンフリクト

このように外部起因によって生じた問題で、話者が行為者の行為によって解決が計られると見なす問題を本稿ではコンフリクト(葛藤)と呼ぶ。補助動詞「やる」は、発話者が見なすコンフリクトが存在すること、および、文の中の行為はそのコンフリクトの解決の手段となっていることを意味している。「やめてやる」では、教官との間に生じた諍いが学生の「やめる」という行為によって解決がもたらされると話者である学生が認識していることを示している。

- 12 a.死んでやる
b.殺してやる
c.(試験に)受かってやる
d.金メダルをとってやる

についても、同じく、側でこの発言を聞いた第三者はこのような発言あるいは決意表明の中に、話者がみなすところのコンフリクトを推測することが出来る。

また、小泉他⁴⁾は、「やる」の意味として「ある行為をする決意をする」をあげている。しかし、「やる」は単なる意志ではなく、先ほど述べたようにその背後にコンフリクトが存在していることと、その解決は行為者によってなされることを意味しているのである。

例えば、

夫が妻のだした手料理を前にした際の「食べるよ」と「食べてやるよ」を比較してみよう。もし、「やる」が単

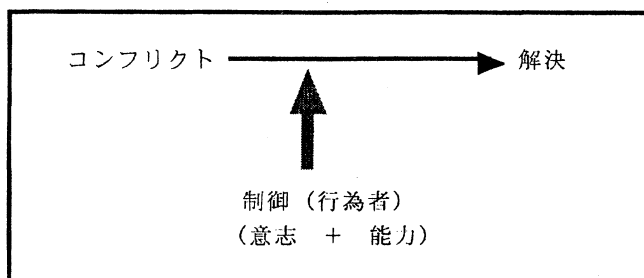


Fig. 2 「やる」におけるコンフリクトと制御の関係

なる意志の表現であるならこの2つには食事するという意志表現として同等であるはずである。これについて読者は、透明人間となってこの二人の会話を盗みぎきするとする。あるいは、偶然付けたテレビのなかの食卓で夫が妻にむかってこのことばを発した場面を聞いたとしよう。この二人が夫婦喧嘩をした直後と、夫が家に帰ってきた直後を想像していただきたい。どちらの言語表現がどちらの場面に適合するであろうか。通常は、「食べてやるよ」は夫婦喧嘩の後に、「食べるよ」は夫が帰宅した場面により適合すると見なされる。これは補助動詞「やる」にはそれ自体が以前にコンフリクトが存在していたことを表しているためである。しかも、この「たべる」という行為によってそのコンフリクトの解決が計られるのであるから、コンフリクトの内容は食事をとる、とらないであることも推測できる。したがって、「やる」は単なる意志ではないことがこのことから明らかとなる。

2.5 制御性

また、「やる」において、コンフリクトの存在とともに重要と考えられるのは、行為者のコンフリクトへの制御性である。行為者は、コンフリクト状況に対して、その状況を解決するだけの能力とそれを実行する意志を持っている。たとえば、冒険物語の中で、旅人が旅の途中、怪物と出会ったとしよう。この怪物は、「おまえをくってやる」という言語表現を用いたとしてもまったく違和感はない。むしろ「おまえをくう」よりもより場面に適した感じを与える。これは、怪物が、旅人との出会いをコンフリクトと見なし、自らがこの状況を解決する決定権を握っているという認識を持っていることを表している(Fig. 2)。この場合は、怪物は自らのこの場面に対する制御を認識している。ゆえに「くってやる」以外の選択肢、「逃がす」などにも同様に「逃してやる」のように「やる」をつけることが出来る。繰り返しになるが、この状況において誰が支配権を握っているのかは、話者の主観的な認識によっている。実際には、怪物は旅人によって倒されてしまうかもしれない。逆に旅人がこの状況を自らの力で解決しようと考えれば、彼は「おまえ(怪物)を倒してやる」「逃げてやる」という表現を使用するであろう。

以上の事例は、言い切りで宣言という事例であった。そのため、行為者と話者が同一であり、コンフリクトや制御の認識が話者のものか、行為者であるかが不分離であっ

た。そこで以下で行為者と話者が一致しない例を分析する。

13 a. (ボスが手下に) 強情をはるようなら、こいつをこ
ろしてやれ。

(こどもが友人に学校の成績の不出来をなじられているのを聞いた親が)

b. おい、こうなったら東大にうかってやれ

c. おまえをバカにした世間を見返してやれ

d. そんな会社、首にされる前に自分から辞めてやれよ

例13は、言い切り、宣言ではないが、受益者が明白ではなく、他人の利益・恩恵として説明できない事例である。従って「やる」の例と見なされる。

ここでは、話者がコンフリクトを認識し、その解決を聞き手/行為者の行為に求めている。そこで、話者はコンフリクトへの制御性が行為者に備わっていると認識し、解決のための行為を行うことを行為者に要求している。

2.6 受益補助動詞「やる」におけるコンフリクトと制御

それでは、上述のような図式にしたがって受益補助動詞「やる」について考えていくとする。受益補助動詞「やる」の典型として「とってやる」を取りあげる。これは受益者は、何かものをとってもらおうという利益あるいは恩恵を受けている。その意味で受益補助動詞の例と見なしてよい。

14 (君のために)(僕が)(パンを)とってやる

これを「話者が行為者の外部にコンフリクトの存在を認知し、行為者がそのコンフリクトを解決する能力をもっており、自らの意志でその行為を行いそのコンフリクトを解決する」という視点で解釈を試みる。コンフリクトは、「君がパンをとりたいが、まだそれを手に入れていない状態」である。話者は、この状態において「行為者はそのコンフリクトを解決する能力を自らがもっており、自らの意志で、パンを相手に渡し、コンフリクトを解決する」ことを表明している。

また話者と行為者が一致しない事例を次にあげてみる

15 (彼女のために)(彼が)パンをとってやる

この場合、話者は「彼女が何らかのコンフリクト状況」にあり、「行為者は、そのコンフリクトを解決する能力をもっており、その意志もあったので、パンを相手に渡し、コンフリクトを解決する」ことを意味している。ここで重要であるのは、このコンフリクトに対する強い制御性は行為者にあるのであって、話者にあるのではない。話者にあるのは、コンフリクトが存在するという認識と、行為者

がそれを解決するための強い制御性を有しているという認識である。

つまり、「やる¹」「やる²」ともに同様の認識過程がその基底に存在していると考えられる。

以上のように「やる¹」「やる²」ともに同様の認識がその基盤にあるとすれば、なぜ受益補助動詞としての「やる¹」と否定的感情の表出の「やる²」という意味的差異が生じることとなるのか。この問題を考えるには制御性について考察を進めなければならない。

3. 制御性と関連する問題

3.1 制御性と対人的上下関係

通常は個々のコンフリクト状況においては解決の手段を持つ者が強い制御性をもつこととなる。社会的役割が上位の者が、強い制御性を有している。例えば、部下と上司の間で何らかの諍いが持ち上がった場合、上司は部下に対して強い制御性をもっている。コンフリクトの解決の決定権は上司に帰属する。このようなコンフリクト状況における制御の強さの差は上下関係に起因する。

補助動詞「やる」は、コンフリクトの解決について強い制御性を行為者がもっていることを示していた。

いま、二人の人物を想定する。一方の人物が補助動詞「やる」を用いて、自己がある行為を行うことで、存在するコンフリクトを解決する旨を表明したとする。これは、コンフリクト状況における自らの制御性を宣言することとなる。一方、もう一方の当事者である人物は、聞き手として存在する。彼は、コンフリクトに対する制御性を宣言していない。とすれば、話者は、自らと聞き手の間にそのコンフリクト状況に対する制御性の差を宣言したこととなる。そして、この制御性の差は対人的な上下関係と結びつく。つまり、この場合、話者は聞き手に対して自らがより上位の位置にあることを宣言している。

例えば、会社で部下が上司に対しておこなった

16 やめてやる

という発話は、通常の意味での制御の差を逆転させることを意味している。このような発話をすることで、部下である行為者は、会社の中に存在していた上下関係にもとづく制御の強さの差-上司>部下-という関係を逆転させ、このコンフリクト事態を自らの制御の下、解決を図った、つまり自分を上司に対して上位においた、という認識に至るのである。このように考えると、学生や会社員が単に「やめる」とう表現ではなく「やめてやる」という表現を用いることの意味が明白となる。つまり「止めてやる」とうことばの中には、外部との間にコンフリクトが存在したこと、そして自らの制御下でそれを解決し、自らが相手に対して上位に存在であるという意味が含まれている。このように「やる」は、通常の社会的役割にもとづく制御性や上下関係を逆転させるという目的に用いられることもある。

小泉他⁹⁾は、「やる」の用法の中に「目下の人・動物植物などに何かをする」をあげている。これは、「やる」のもつ制御性と対人的上下関係に依存した用法と考えられる。

3.2 否定的感情の表出

以上のように、「やる」が話者と聞き手の間に新たな上下関係を引き起こすとして、それは聞き手にとってどのように認識されるのか。対人的な上下関係と発話による上下関係に矛盾がない場合、特別の問題を引き起こさない。例えば、上司が部下に対して「飯をおごってやる」という場合などである。この場合、聞き手の部下は、上司が上位に位置することになんらの疑問も持たない。しかし、対人的な上下関係と発話によって生じた上下関係に矛盾が生じる場合が存在する。たとえば、対人的な関係が同等である二者において「やる」を含む文章が発話された場合である。同じ大学の同級生同士で

17 心理学のノートを貸してやる

という発言が一方からなされた場合、この発話は話者を上位に聞き手を下位に位置づけることを意味する。対人的に同等と考えている相手との間でのそのような上下関係の表明は、聞き手にフラストレーションを引き起こす。しかし、聞き手にとって話者の行為によって得られる利益が十分であれば、それから得られる満足はそのフラストレーションを補償することとなる。しかし、もし、聞き手の学生が既に他の学生から心理学のノートを手に入れていたとすれば、話者の行為によってはなんら利益をもたられず、下位に位置づけられたとするフラストレーションのみが残ることとなる。また、対人的に下位の者が上位の者に対して「やる」を用いた場合にも同様のことが生じる。このフラストレーションに対する利益の補償の程度は、聞き手が話者との対人的関係をどのように見なしているか、利益をどの程度と見積もっているかによって変わってくる (Fig. 3)。

つまり、コンフリクトの当事者同士で会話がなわれた場合、「やる」は当事者間での相対的地位を表明することとなる。聞き手は、利益が十分である場合は、相対的位置の低下に伴うフラストレーションを補うことが可能であるが、利益が十分とみなせない時フラストレーションが残る

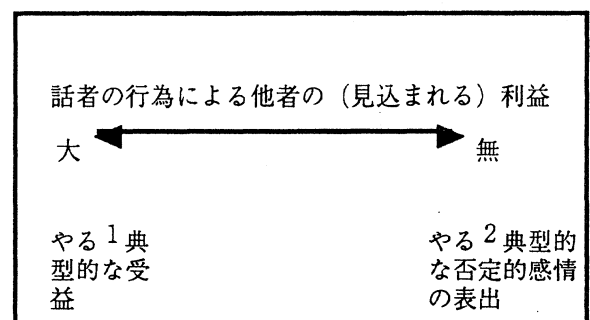


Fig. 3 「やる」の2つの用法における利益の差

こととなる。また時に、話し手は、利益を与えないあるいは少ない利益しか与えない状況での「やる」の使用が聞き手にフラストレーションをもたらすことを認識している。これが、「やる」が否定的感情の表出と見なされる原因である。

しかし、フラストレーションを感じさせる相手が存在しない場合もあり得る。たとえば、

18 大学に受かってやる

では、特定の人物との相対的地位が問題となっていわけではない。ここでは、行為者がコンフリクトに対する自己の制御性を宣言していると見なすことが出来る。

4. 受益補助動詞「くれる」「もらう」

4.1 「くれる」「もらう」のコンフリクトと制御性
他に受益補助動詞として分析が行われる「くれる」と「もらう」についても、「やる」と同様にコンフリクトと制御性で説明が可能であろうか。

19a.(彼女のために)(彼が)(パンを)とってやる。

b.(彼女が)(彼に)(パンを)とってもらう。

c.(彼女のために)(彼が)(パンを)とってくれる。

これらはすべて、話者がみなすところのコンフリクトの解決のための行為を表している。また、行為者がコンフリクトの解決に対して強い制御性を持っているということでも共通している。

以上をまとめるとTable 1のごとくなる。

Table 1

表現	話者がみなすところの		
	conflictの存在	受益性	行為者の制御性
する	±	±	±
やる1	+	+	+
やる2	+	-	+
もらう	+	+	+
くれる	+	+	+

これらは多かれ少なかれ、コンフリクトに対する行為者の制御性を表している。しかしながら、少ないながら一見例外的に見える用例も存在するのでそれについて言及しておく。

例えば、「死んでくれた」や「死んでもらった」などである。これは行為者自身が自らの制御の下、死という行為に至ったのではない場合においても用いられる。にも関わ

らずこれらの表現には行為者が自らの意志で死を選び、あるコンフリクトを解決したかのような意味が読みとれる。

19 あいつには死んでもらおうと思っていたが、こちらが手を出す前にあいつが勝手に死んでくれた

この場合の「死んでもらう」と「死んでくれる」は両方ともコンフリクトが行為者の死によって解決されることを意味している。ここでのコンフリクトの存在は、行為者自身は必ずしも認識していないかもしれない。このコンフリクトは話者にとって存在すればよい。「死んでもらう」では、行為者には制御性はなく、制御性は話者にある。これは、「殺す」という非常にネガティブな行為の実行について、それを直接的に自己の制御下に行うという表現をさけるためこのような表現法が選ばれたと考えられる。一方、「死んでくれた」では、もちろん、実際に「あいつ」が「死ぬ」に際して制御性をもっていたということではないが、こちらでなにもしなかったのに死んだということを強調するため、あたかも、行為者が制御性をもっていたかのような言い方をしている。

4.2 「もらう」「くれる」における話者、受益者、行為者の関係

4.2.1 「もらう」

20. a. 私が 彼に パンを とってもらう。

b.*彼女が 私に パンを とってもらう。

c.*彼が 彼に パンを とってもらう

aは、自然であるので話者と受益者は一致してもよい。bの文は不自然と感じられるから、「もらう」では話者と行為者は同一であってはならない。cの文は、不自然であるので受益者と行為者が一致してはならない。

4.2.2 「くれる」

21 a. 私のために 彼が パンをとってくれる

b.*彼女のために 私が パンをとってくれる

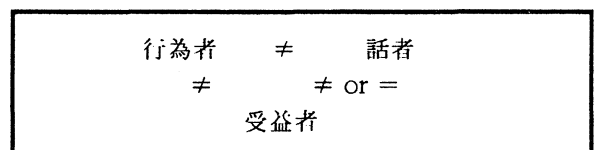


Fig.4 「もらう」「くれる」における行為者、話者、受益者の関係

c.*彼女のために 彼女が パンをとってくれる。

aは、自然であるので話者と受益者は一致してもよい。bの文は不自然と感じられるから、「くれる」では話者と行為者は同一であってはならない。cの文は、不自然であるので受益者と行為者が一致してはならない。

ゆえに「もらう」「くれる」ともにFig.4のような図式が成り立つ。

ただし「くれる」と「もらう」では主語が入れ替わっている。「もらう」では、主語が受益者であるのに対して、「くれる」では主語は行為者である。

5. まとめ

補助動詞「やる」の意味には、他者への恩恵・利益（やる¹⁾）、他者への否定的感情の表出（やる²⁾）という相反する2つの側面が有る。本論では「やる」の背後にある認識を分析し、対極的に見える2つの意味の普遍性を見いだそうとした。「やる」の使用にあたっては、1) コンフリクトの存在、2) 行為者によるコンフリクトの解決可能性、3) 行為者の制御性という3つの要因が話者に認識されている必要があることが明らかとなった。また、上述の分析から「やる」が持つ対人的上下関係におよぼす効果が説明された。さらに、受益的補助動詞「くれる」「もらう」についても同様の分析が出来ることを示した。

以上のように「やる」の使用は、特定の認識・意図・感情がその本質的条件となる。聞き手は、「やる」の背景にある話者の認識・意図・感情を推測することとなる。

引用文献

- (1)金田一春彦 1955 「日本語文法」市川三喜・服部四郎編 世界言語概説 下巻 研究社
- (2)久野すすむ 1978 談話の文法 大修館書店
- (3)宮地裕 1979 「やる・くれる・もらう」を述語とする文の構造について。川本茂雄ほか編、日本の言語学 第5巻 意味・語彙編 235-256
- (4)小泉保・船城道雄・本田晶治・仁田義男・塚本秀樹編 日本語基本動詞用法辞典 大修館書店

謝辞

本稿の作成にあたって、室蘭認知科学研究会の方々に貴重な御意見・御助言をいただきました。感謝いたします。

漢字・読字書字困難を示す学習障害の症例

松本 敏治*

A case study of a child with learning disability for reading and writing Kanji character

Toshiharu MATSUMOTO

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

The purpose of this paper is to report a learning disabled child with a disorder involving Kanji reading and writing. The patient was 13-years-old boy. Although he showed generally normal intellectual ability and his performance on WISC-R indicated that VIP was 100 and PIQ was 113, his could only read 71% of Kanji, which he learned at age 6 to 8. He could only write 27% of that. A test of reading ability showed that his performance of reading was significantly lower than average. Some test of Kanji reading and comprehension indicated that he could comprehend the meaning of Kanji, which he could not utter. On the other hand, he could visually memorize the shape of Kanji both in short term and in long term. His problem in processing Kanji character was discussed.

Key words : learning disability, Kanji, reading, comprehension

1. 序

現在、日本においても学習障害の存在とその問題はひろく認知されるようになり、その研究も活発なものとなっている。学習障害を考える上で重要であるのは、類型化にもとづく基本的症状の理解とともに個々の学習障害児の理解である。Lyon⁶⁾は、時に類型化が学習障害の理解や治療を阻害する要因となることを指摘している。学習障害をいくつかの型に分類することで、学習障害児の個々の差が不問とされ集団としてまとめあげられる。またIQや社会経済的地位、学習の機会などで分類した場合でさえも分類された群内の学習障害児が基本的な読み能力の発達に関連すると思われるスキルに有意な差が存在することが考慮されてい

ない。この意味から個別の症例について、その認知的能力や学習過程を広範に検討していく必要がある。

今回、著者は、漢字読み・書字に困難を示す症例を経験し、検討を行ったので報告する。

本症例が現在抱える学習上の問題はいくつか存在するが、そのうちもっと重要と考えられものに漢字読み・書字の問題がある。現時点で平仮名の読みに問題はないものの、漢字混じり文の読みに困難を抱え、学校での学習場面やテストにおいて問題を示す。一方、非文字的理解には問題が見られず、日常会話においてなんら違和感を感じさせない。

本論文では本症例が示す漢字読み・書字に見られる問題を明らかにし、いくつかの漢字理解モデルとの関連で本症例を検討する。

* 共通講座

2. 症例報告

2.1 症 例

13歳、右利きの男子、現在普通中学校在学中。正常分娩。8歳10ヶ月の時、小児科医より学習障害の疑いで著者に紹介された。1歳3ヶ月より嘔吐を繰り返し周期性嘔吐症と診断される。4歳2ヶ月腹痛が強く、腹性癲癇を疑われEEGを施行。右側頭部にspikeが頻発しており、腹性癲癇として抗けいれん剤投与を受け、腹痛嘔吐はコントロールされている。主治医から小児精神医に紹介。

2.1.1 主 訴 ひらがな読みが下手、漢字を憶えられない。それでいて、意見はきちんとまとめて言える。数字は読める。落ちつきもある。

2.1.2 検査結果

a. 8歳8ヶ月：病院において田中ビネー検査、ベンダーゲシュタルトテスト、バウムテストを実施。田中ビネー検査の結果は、IQ113であり、8歳児級では算数問題、9歳児級では図形の記憶問題が出来ない。絵の解釈については全体の状況をつながりとしてとらえることが出来ず、部分的な認知しか出来ず、統合力の欠如を疑わせる。バウムテストはコピッツ法による採点では得点5で、8歳8ヶ月児の平均2.5を上回りやや誤謬が多い。内訳は、ボツ点が小円に変形、統合の失敗、形のゆがみであった。知覚的な成熟度は7歳前半程度。しかし原図形からの著しい逸脱や配置の混乱は見られない。またこの際同時に行われた大脇式精薄児用知能検査からは視覚と運動能力との協応に問題は見られていない。

b. 10歳1ヶ月：ITPAI(Illinois Test of Psycholinguistic Ability, 言語学習能力診断検査)を実施。言語学習年齢8歳11ヶ月。形の記憶はSS平均より19点低く明らかに劣っていると考えられる。また、数の記憶は評価点(SS)平均より6点低く境界線にあると考えられる。一方絵さがしはSS平均より9点高く境界線にある。全体に言語学習年齢は低い。ITPAのモデルに従えば、問題が見られるのは連合過程の中の自動水準部分の配列記憶能力に関連した部分である。言語学習年齢が8歳11ヶ月と低下しているが、この低下の主たる要因は先に挙げた配列記憶能力に関連する部分であり、これ以外のものは、コトバの表現の8歳2ヶ月をのぞけば、9歳以上の能力を示している。

c. 12歳2ヶ月時点：ベントン視覚記憶検査、標準失語症検査(SLTA)、K-ABC(Japanese Kaufman Assessment Battery for Children, 心理・教育アセスメントバッテリー)を実施した。ベントン視覚記憶施行法A(10秒間提示、即時記憶)、施行法C(模写)、施行法D(遅延記憶)を実施。誤謬数はそれぞれに2, 0, 2であり、年齢および知能指数からの予想点からの隔たりはなく、視覚記憶および視覚運動機能の障害を示すような所見は得られなかった。SLTAでは漢字・単語の書字、漢字・単語の書取と計算に関する項目が1標準偏差より低い値を示した。このうち計算は、加算減算は5問中4問の正解であったが割り算ではもっとも難易度の低い1問を正解したのみであった。K-

ABCの結果は、継次処理・同時処理・修得度の標準得点はそれぞれ88±9, 89±9, 77±5であった。手の動作、語の配列、模様の構成、位置探しの評価点がそれぞれ7, 7, 7, 6である。修得度では算数、ことばの読み、文の理解の標準得点が69±8, 61±5, 86±8であった。

WISC-R(Japanese Wechsler Intelligence Scale for Children-Revised, 知能検査)は、10歳3ヶ月と12歳1ヶ月の時点で施行。10歳3ヶ月時点ではIQ102, 言語性IQ108, 動作性IQ95であり、うち算数問題と積木模様の評価点が7点であった。一方、理解・組み合わせ・迷路は15・14・14と高い評価点を示した。12歳1ヶ月の時点では、IQ107, 言語性IQ100, 動作性IQ113であり、評価点が7点以下であったのは、算数の3点のみであった。積木模様は10点であった。単語・理解・絵画完成・絵画配列はそれぞれ13・14・15・15と高い評価点を示した。

2.1.3 面談および心理検査によって明らかになった点

ひらがな・カタカナ文字読み、書字における鏡文字、ひらがな書字、書き順、鏡文字と正文字の弁別、左右の認識、九九、形の記憶などの問題があげられる。九九では、1×6をロクイチと読むなどの誤りが見られた。

2.2 手続き

本稿で報告する実験は、本児が12歳になった1月から9月にかけて実施したものである。

2.2.1 T K式読み能力診断検査 生活年齢12歳11ヶ月で実施したところ次のような結果であった。全体にかなり低い値を示した。

テスト1(語識別) 段階値 2(偏差値30-40)

テスト2(語識別) 段階値 4(偏差値40-44)

テスト3(文理解) 段階値 3(偏差値35-39)

テスト4(文章記憶)段階値 5(偏差値45-49)

テスト5(推論) 段階値 2(偏差値30-34)

2.2.3 視覚的意味処理 漢字理解の過程は大きく2つが存在すると考えられる。一つは、平仮名やカタカナにおいて見られるように文字を音に変換してから意味づけを行う処理過程(音韻的処理過程)。2つ目は、漢字において顕著であると考えられる視覚的意味処理過程である。視覚的意味処理過程では、文字である漢字は音韻的処理を経ることなく直接意味づけが行われる。次に行った一連の実験は、本症例の音韻的処理過程と視覚的意味処理過程について検討を行うものである。

a. 漢字読みテスト：漢字読みのテストを行った。用いた文字は、小学校1年・2年・3年の漢字56文字である。

※結果 正答は41。正答は1年生漢字で18/18, 2年生漢字で12/19, 3年生漢字で11/19である。誤り15のうち無反応が10。読み誤りは「自」を「しろじゃない」, 「里」を「せい(星座の星)」, 「宮」を「し」, 「持」を「じかんのじ」, 「宮」を「し」と読んだ理由は友人に「四宮」という姓のものがおり、その姓の中にこの字があった気がするからという。

b. 意味関連漢字選択課題：視覚的意味処理過程をつぎのような手続きで検討した。刺激材料として、次のよ

うなカードが用意された。カードの上部に1漢字、その下に4漢字が四角い枠に囲まれて、2列2行で表示されている。このようなカードが74枚作られた。上部の漢字は小学校5年生までに学習する漢字である。

課題は、カードの上部の漢字と意味的に関係がある漢字を下の4つの漢字から選んで指さすというものである。選ばれた文字は、意味的に対になるあるいはおなじカテゴリーの漢字(1文字)をもつものである。例：上と下、悲と楽、打と投、目と歯。下の4つの選択肢のうち1つは、上部の漢字と意味的なつながりをもつ。当初、78枚のカードを作成した。作成したカードについて第三者の成人に課題を行い、正確に反応でき、判断に困難が無いとした74枚を本実験の為に使用した。

※結果 本児は、74枚のうち60枚で正確に意味的に関連性のある文字を選んだ。ランダムに反応したとすれば、正答率は25%前後となると考えられる。本児の示した正答数は有意にチャンスレベルを上回っている($p<0.01$)。正解のうち、旁や偏など漢字の一部が重複している事例は3つのみであるので、形態上の類似性を手がかりとした反応とは見なし得ない。また、本実験実行後に漢字の読みおよび意味を尋ねた。正答であった60対のうち13対で、一方あるいは両方ともに読めなかったか読みが不正確であった。この結果は、音韻の処理が出来ない漢字であっても視覚的意味処理が可能であることを示唆した。

c. 漢字意味理解(文脈依存)：以上の実験は、本症例は読みが出来ない漢字でもその意味を理解出来ることを示唆していると思われた。しかし、上述の実験は、「上・下」「投・打」など熟語の構成要素となるものが含まれており、このような常にペアとなって提示されることが反応の手がかりとなったとも考えられた。そこで文脈に即した漢字を選択するという課題を用いて自発的には読めない漢字の意味理解が可能であるか否かを調べた。初めに意味関連漢字選択課題後の読みの調査で読めなかった文字から41文字を選んだ。これら読みが出来ない漢字についてその意味理解をつぎのような手続きで調査した。「ほくは(悲・問・暑・向)しい」などの文章を書いたカードを作成した。課題は文章の意味内容に適合した漢字を選択することである。実験者はひらがな部分を読み上げて被験者に反応を促す。漢字部分については「シー」と発声した。「ほくはシーしい」などである。正答の漢字の位置はランダムである。

※結果 正答数は32/41(78%)であった。この値は有意にチャンスレベルを上回っている($p<0.01$)。

d. 熟語意味理解(文脈依存)：漢字意味理解課題での漢字の中には単独で用いられることが稀で通常送りがなを必要とする漢字も含まれていた。このような送りがなの情報が選択の手がかりとなった可能性があることから、送りがなを必要としない熟語について、意味理解を調べた。予備実験として、1,2,3年生で学習する漢字から構成された熟語527個についてその読みを調べた。正確に読め

たのはほぼ半数の273(54%)であった。読めなかった熟語からランダムに100個選び、「かれの(作文・毎週・車道・苦手)はとてもおもしろい」などの文章を書いたカードを作成した。課題は文章の内容に適合した漢字を選択する事である。実験者はひらがな部分を読み上げて被験者に反応を促す。熟語部分については「シー」と発声した。正答の熟語の位置はランダムに設定されている。選択肢の熟語はすべて予備課題において読めなかったものである。

※結果 正答数は81/100(81%)であり、有意にチャンスレベルを超えた($p<0.01$)。

e. 熟語意味理解(文脈依存・カテゴリー)：熟語意味理解(文脈依存)課題での選択肢は、正答以外は文の意味内容に適合しない熟語が選ばれた。そのため、選択肢の多くは正答とは意味的に異なるカテゴリーに属するものが選ばれた。本症例での漢字意味理解が、正確な意味的理解であるのか、カテゴリーの分類のようなレベルで行われているかは疑問が残った。そこで、同じカテゴリーの熟語を選択肢としてもちいて、熟語理解課題をおこなった。読み不可熟語を次のようなカテゴリーに分類した。

1. 人物(例：代表、画家)、2. 場所(空港、川原)、3. 行為(返事、転校)、時間(今朝・去年)、6. 人の特性・状態(正直・幸福)、7. 物の特性・状態(広大、安定)、8. 物(荷物、灯油)、9 植物(球根、白菜)に分類した。同じカテゴリーに属する熟語を選択肢として熟語意味理解テストカードを作成した。カードは「ことは、いいことがつづいている。それにひきかえ(今朝・去年・昭和・午後)はひどかった」などである。刺激文は2文からなっている。選択肢は第2の文に含まれる。選択肢は同じカテゴリーに属し、かつ第2文のみでは、すべて意味的に適切なものが選ばれた。選択肢の適切性は、第一文により決定される。選択肢の適切性については成人を対象に同課題をおこない、課題作成者と解答が一致したカードを刺激として採用した。課題は文章の内容に適合した漢字を選択する事である。実験者はひらがな部分を読み上げて被験者に反応を促す。熟語部分については「シー」と発声した。正答の熟語の位置はランダムに設定されている。

※結果 100カード中正答率82枚(82%)で熟語意味理解課題の正答率との間に有意な差は見られなかった。このことから、少なくとも熟語の意味的弁別が、単なるカテゴリーの弁別ではないことが明らかとなった。

f. 読み対応熟語選択課題：熟語は、高い有意味性を有している。本児の場合、熟語から音韻の処理にもとづいた読みを導くことは出来なくとも、意味理解は生じると考えられる。故に、高い有意味性をもつ読みと熟語を結びつけることはより容易であろうと考えられた。熟語意味理解課題において用いた漢字を刺激として用い、熟語読みに対応する漢字熟語を選択する課題を行った。カードの上に熟語の読みをひらがなで標記した。下に2行2列で熟語を4つ配列。課題は読みに対応する熟語を選択する

ことである。例：やくいん，女医・院長・役員・味方。カードは100枚。選択肢は，熟語意味理解課題(文脈依存・カテゴリー)と同様に同じカテゴリーに属するものが選ばれた。

※結果 正答率100%。漢字の意味を理解しているか否かについて40語の単語について意味を尋ねたが正確に理解できた。熟語をつかった文章を作るあるいは身ぶりでも熟語の意味を表現した。ここでは，熟語の読みに対応した漢字熟語を選択することが可能であった。このような反応が，漢字についての音韻的处理からの経路によるものか，視覚的意味的处理の経路によって生じたかが問題となる。刺激として用いた熟語は，以前にそれのみでは読みが不可能であったことが確認されたものであった。故に，この結果は，ひらがな読み(音韻的处理)から得られた音に基づいて意味が導かれ，漢字の視覚的意味处理の結果として得られた意味と照合する事によって生じた反応とも考えられる。

2.2.4 音韻的处理の検討

a. 熟語構成テスト：上述のように熟語の視覚的意味处理は可能であると考えられた。次に熟語読みから熟語を構成する事が可能であるかについて検討を加えた。

初めに1・2・3年生の漢字を用いた熟語506と，以前の実験で自発的に発話のあった漢字21熟語を提示し読みを調べた。このうち，254熟語(48%)で正確な読みが可能であった。この内119熟語について，熟語を構成する課題を行った。カード上部に熟語の読みを平仮名にて表記，下に2行2列で漢字を配置。内2文字はその熟語に含まれるものである。他の2文字は音がおなじあるいは類似のものが選ばれた(例，しゅうきん，集・金・習・近)。正答の漢字の位置はランダムに決められた。

※結果 95枚(80%)で漢字およびその順序まで正しく選択することが出来た。正答数は，有意にチャンスレベルを上回っていた($p<0.01$)。誤反応(後に自発的に反応を変更したものを含む)は24枚。このうち，正しい漢字を選んだが順序が間違っていたものは，11回，正しくない漢字を選んだ場合は，13回。音読みが異なる間違った漢字を選択した反応は12回であった。

本症例は，読める熟語の場合，逆に読みからその構成要素である漢字を適切に選択し配置することが可能であった。

b. 漢字-音対応テスト：熟語構成テストでは本児は適切に漢字を選択することが可能であった。しかし，漢字1文字と漢字熟語が別の認知ユニットによって認識されているとする主張がある(佐久間ら¹³⁾)。また，松田¹⁴⁾は単一の漢字は読めるが熟語となったときに読みが損なわれる症例を報告している。本症例について，このような読みが漢字熟語の認知ユニットを経由したもので，漢字一文字に対しては適切な読みが出来ない可能性が残された。そこで，熟語の各漢字に対して読みを適切に対応させるかを次のような手続きで調査した。熟語の熟語構成で用いた熟語を刺激として用いた。カードの下に熟

語，上に読み仮名が書かれている。課題は，下の漢字に対応させて読み仮名を区切る事である。被験者に区切りを指さすように求めた。(例：日光-にっ/こう，少年-しょう/ねん)

※結果 正答率98%。2問のみで誤反応。少なくとも知っている熟語では各漢字に対する音を正確に区別することができた。ただし，この結果を，本症例は漢字と音の対応が正確に行えたことによると解釈するには疑問が残る。本症例は，漢字の読みと対応させたのではなく，通常の音読みについての一般的規則(例：4音の読みであれば漢字はそれぞれ2音づつに対応することが多い。雑音/ざつおん)を用いて反応を行ったのかもしれない。しかし，少なくとも音を分節化して漢字に割り当てることには困難がなかった。

c. 漢字-音読み選択課題：漢字の正しい音読みを選択肢の中から選ぶ課題を行った。カードの上部に漢字を，その下に平仮名で読みを4つ表記。漢字は3年生までに学習する漢字でプリテストにおいて読めなかったものである。読みはすべて音読み。

※結果 70問中38問で正答。正答率54%。本児の示した正答数は有意にチャンスレベルを上回っている($p<0.01$)。

d. 音読み-漢字選択課題：音読みに対応する漢字を選択する課題を行った。カード上部に音読みを，その下に漢字を4つ表記した。漢字は3年生までに学習する漢字で，プリテストにおいて読めなかったものである。

※結果 34問中24問正解。正答率71%本児の示した正答数は有意にチャンスレベルを上回っている($p<0.01$)。

上述の2つの実験は自発的に読みを想起できない漢字であっても読みが選択肢として読みが与えられた場合対応する漢字を選ぶことが出来るとを示す。

2.2.4 読み誤りの分析

a. 読み・意味理解の検討：意味関連対応テストで用いた漢字276文字について読みと意味を尋ねた。

次のものは，読みおよび意味がともに不明(わからない)と答えたものであった。

「悲」「滅」「紙」「良」「守」「行」「打」「読」「近」「追」「仕」「荷」「遅」「往」「息」「投」「絵」「悲」「君」「拾」「河」「板」「代」「何」「返」「晴」「柱」「考」「前」「押」「親」「問」「暑」「向」「腸」

誤反応としては次のような反応が見られた。

<<熟語や単語からの想起>>

「筆」えんぴつのえん，「親」おやこのお，「来」みらいのみ，「弓」や(弓矢から)，「和」しょうわでつかった，「送」ほうそうのほう，「売」しょうばいのしょう，「先」せい(先生から)，「攻」こうげきのげき，「活」せいかつのせい，

<<意味的関連を伺わせる誤り>>

「想」かんだうのかん(感想と感動の混乱)，「宿」りよかんのりよ・やすむといういみ(宿舍と旅館の混

乱), 「記」にっしのし(日誌と日記の混乱), 「買」ひん・かうとかしょうひんとか, 「胃」はね, 「弟」あにかおとうと, 「妹」あねかむすめ, 「姉」あねかいもうと, 「湯」おゆ・おん, 「深」せんすいとかんけいがあ, 「晴」ひにちのひ,

<<送りがなや漢字と音の対応の誤り>>

3「思」おもうのお, 「安」あ(安全から)・やすくするとか, 「楽」たのしい, 「薬」く, 「答」こたえのこ,

<<形態的類似性に基づくと思われる誤り>>

4「苦」わか(若), 「短」まめ(旁の部分から), 「働」うごくのどう(動), 「速」えん(遠), 「林」すぎ(意味的類似性あり), 「遠」そくどのそく, 「池」てんちのち(音韻上の類似性あり)

<<音韻上の類似性に基づくと思われる誤り>>

「後」こうごのご

<<その他>>

「守」あん・あ, 「孫」そ,

また, 以下のものは読めたがその意味について尋ねたところ答えられなかった。

「係」けい, 「員」いいんのいん, 「感」かんだうのかん, 「教」きょう, 「品」しょうひんのひん, 「使」てんしのし, 「植」なおき(人名)につかう, 「書」しょ, 「汽」じょうききかんしゃのき, 「玉」たまきこうじのたま, 「回」かいすうけんのかい, 「根」はこねのね, 「計」けいさんきのけい, 「生」せいぶつのせい, 「定」ていかのてい・もとの値段という意味, 「後」あと, 「学」がく, 「線」アニメの登場人物の必殺技のなかにでてくる, 「悪」あくまのあく・あくまのあ, 「遠」えん, 「住」じゅうたくのじゅう・すむとはよまない, 「赤」せきがいせんのせき・あかじゃない, 「油」じゅうゆのゆ, 「引」やすい・ねびくのひく, 「問」もんだいのもん

b. 単漢字の音読みチェック:1年生から3年生までに学習する漢字440の音読みチェックした。正答は202であった。誤反応について, 次のように分類した。

<<熟語からと思われる誤り>>

算 すう(算数から), 毎 しゅう(毎週から), 飲 さけ(飲酒から), 路 せん(線路から), 界 げん(限界から), 勉 きょう(勉強から), 題 もん(問題から), 京 とう(東京から), 炭 もく(木炭から), 局 やく(薬局から), 央 ちゅう(中央から), 話 つう(通話から?), 計 ごう(合計から), 言 ご(言語から), 係 かん(関係から), 古 ぶん(自ら「古文のブン」という), 練 しゅう(練習から), 暗 こく(暗黒から), 遠 そく(遠足から), 橋 たか(タレントの石橋貴明から), 具 ぶん(文具から), 由 じ(自由から)

<<意味的関連からと思われる誤り>>

寺 じん(寺→神社からか?), 早 そく(速との意味的類似性から), 寒 ふゆ(寒→冬の意味的推論から), 本 ぶん(本→文の意味的連関から), 湯 おん(お湯→温泉か

ら?)

<<形態的類似性の故と思われる誤り>>

運 ぐん(軍), 里 せい(星), 童 じゅう(重), 丸 きゅう(九), 間 もん(問), 札 さつ(札)

, 他 チ(地), 庫 シヤ(車)

<<送りがなや漢字と音の対応の誤り>>

岩 い(いわ), 駅 き(えき), 病 び(びょうき), 住 じゅう(じゅう), 宮 み(みや), 緑 み(みどり), 秋 き(あき), 答 こ(こたえ)

<<その他>>

起 ちゅう, 放 ふう, 去 ほう, 意 おけ, 和 じ, 戸 し, 予 よう, 列 れい, 服 ひ, 式 どう, 帰 かい

2.2.5 視覚的形態記憶

a. 漢字書取テスト: 小学校1年・2年・3年で学ぶ漢字からそれぞれ10文字をランダムに選び書取を行う。書取では実験者が文章読み上げ, 対応する漢字を書くように指示する。「いしをなげるのいし」あるいは「ゆびをつかうのゆび」のように指示する。

※結果 正答は全体で8/30。正答はすべて1年生で学ぶ漢字のみである。「石」「中」「王」「円」「雨」「手」「大」「車」を正しく書取出来る。2年生以降の漢字についてはすべて, 無反応。

b. 記銘再生テスト: 本児における漢字書字の困難が漢字の視覚的形態保持が出来ないため学習が不全となった可能性が存在した。本児の視覚的形態の保持を漢字の記銘再生実験により調査した。漢字読み課題で用いた漢字から30問を選び記銘再生のテストを行った。5秒間漢字を提示し, 直後に再生させた。

※結果 30問中正解は27問である。誤りは「鳥」「旅」「星」。鳥は全体に「馬」のような字に変形。「旅」は作りが不正確となっている。星は「生」の部分の真ん中の横棒が欠けている。また, 字形としては正しいものの, 「銀」の傍の部分が日とその下の部分が分断されるなど一筆で書かれるべき部分が分断される反応が見られた。また, 筆順にはかなりの誤りが見られる。漢字を対象とした視覚的形態の保持そのものには問題が見られなかった。

c. 記銘再生テスト(繰り返し): 上述のように漢字の形態の短期的記憶自体には問題が見られなかったものの筆順や書字には多くの問題が確認された。字形自体の再生は比較的問題がないものの, 漢字の構成要素への適切な(部首への)分節化が適切に行えているかに疑問が残った。そこで, 漢字の記銘再生課題を繰り返し実施し, 再生における筆順を分析することで分節化が適切に行われているか否かを検討した。1・2・3年生からそれぞれ20文字をランダムに選び記銘再生課題を行った。おなじ刺激を提示順序を変えて3回提示した。線や点の過不足が見られた場合を誤答とした。

※結果 誤答数は第一回目7(12%), 第二回目8(13%), 第三回目4(4%)であり, 11種の漢字で誤りが見ら

れた。第三者に描かれた漢字を同定することを求めたところ、正しく判断できなかった文字は、1回目2、2回目3、三回目2であり、ほとんどが判読可能なものであった。描かれた筆順について分析したところ、3回とも同一の筆順を用いて書かれたものは、26/60であった。筆順一致率は1年生漢字で55%、2年生漢字で45%、3年生漢字で25%であった。1・2・3年生の漢字の平均画数は、6.05、7.75、9.4であり画数の上昇とともに筆順の一致率が低下している。漢字の基本単位(部首)が一連のものとして書かれたか否かについて分析した。その結果、2つの部首の一部を交互に書いた例は60例中一例のみ。多くの場合、部首は連続して書かれた。故に、漢字を視覚的に正しく各部首に分節化する事は可能であることが伺われる。しかし、通常の運筆規則からかけ離れた筆順も見られた。以上の事は形としての漢字の短期的記憶および分節化には問題がないことを示している。しかし、おなじ漢字単位(部首)で筆順が安定しないことは、書字のための運動プログラムが十分に形成されていないことを示している。

d. 記録再認実験：上述のように、本児は漢字の視覚的形態を短期的(10秒程度)に保持できることが明らかとなった。そこで、視覚的形態の長期的保持が可能であるかを調査するため、記録再認実験を行った。旧刺激として1年生から6年生の漢字を各学年から20づつと平仮名22文字、計142文字をランダムに選んだ。また、市販のイラスト集より旧刺激として142個を選んだ。新刺激として、同数の漢字・平仮名・イラストが、おなじ手続きで選ばれた。コンピュータ画面上に5秒間に一文字のペースで刺激を提示。指示として「これから文字が出てきます。後でいろいろな文字を出して、その文字がこれから見る文字の中に合ったかどうか尋ねます。」を与える。すべての旧刺激を見終わった後、5分して再認課題を行った。被験者には、ゲームパッドが手渡される。課題は、提示された刺激が旧刺激の場合には上ボタンを、新刺激の場合は下ボタンを出来るだけ速く押すというものであった。

※結果 文字刺激に対する全体の正反応率は67%、平仮名で60%、漢字で69%であった。すべてで、正答数はチャンスレベルを有意に上回った ($p<0.01$)。また、イラストの正答率は84%とかなり高い正答率を示した。大学生1名を統制群として漢字・平仮名の記録再認実験を行った。結果、全体の正答率は65%、平仮名69%、漢字65%であった。本児は漢字・平仮名の長期的記憶において健常成人と同程度の成績を示した。以前の漢字読みについての結果からは、本実験で提示された漢字刺激のうち少なくとも3分の2以上が本児にとって読み不可であると思われる。本児は本実験の課題遂行にあたって主に視覚的形態の記憶に依存したと推測できる。また、イラストの再認においても84%という高い正答率を示した。これらのことは、漢字および平仮名を刺激とした場合も含めて視覚的な長期記憶および視覚刺激の相互弁別に問

題がないことが明らかとなった。

3. 考察

心理テストバッテリーにおいてもっとも顕著にその特徴が現れたものは、K-ABCテストである。K-ABCテストにおける結果を他のテスト結果と照合させながら考えて見よう。K-ABCは継次的処理および同時的処理ともに全体に低い値を示している。一方でWISC-Rおよびビネー検査の結果はいくつかの項目で低い値を示すものの全体的にはさほど低い値を示していない。WISC-Rおよびビネー検査ではテスト自体が習得度(知識)などに依存したものが多く、そのため、本症例では認知的処理過程の軽減をはかるような形での方略を用いた可能性もある。K-ABCにおいてなぞなぞ以外の習得度が低いことについては、ことばの読みおよび文の理解では読字の困難があるため、全体として低い点を示したと考えられる。

ITPAの結果は表象水準の処理能力が自動水準における処理能力より高いことを示している。

文字読み・理解過程として多くの理論は上述したような二つの経路を想定している。海部⁴⁾、斉藤¹²⁾らは、漢字は意味的処理へと直接的な経路をとるが、カナ表記語は形態処理から音韻的処理を経て意味的処理に至るとするモデルを提出した。これに対して井上²⁾は、漢字処理およびカナ処理でまったく異なる経路を取るのではなく形態処理、音韻的処理、意味的処理という3つの処理が相互に作用しあうモデルを提出した。漢字表記語の場合には音韻的処理の優位性が低いことが特徴であると主張する。また御領¹⁾は、漢字表記語は音韻的処理と意味的処理の両方に直接的に結びついており、音韻的処理と意味的処理が相互作用するモデルを提出している。岩田¹⁾も漢字は表意的な機能と共に表音的な機能も有することから、単なる表意文字と見なすことに異論を唱えている。中国語を母国語とする被験者についてではあるが、漢字の処理において形態処理と意味的処理の間に音韻的処理が存在することをTan, Hoosain, & Peng¹⁵⁾、Perfetti & Zang¹¹⁾が見いだした。水野¹⁾は、漢字表記の処理はカナ表記語と同じく形態処理→音韻処理→意味処理という経路でなされていると主張する。漢字表記とカナ表記語の差は、漢字表記語では多くの場合、音韻的処理が自動化されている点である。宇野¹⁷⁾は失語症の障害メカニズムの側面から文字読み・理解について次のようなモデルを提出している。彼のモデルでは、音読において漢字とカナの処理過程は異なる。漢字においては2つの経路が想定される。1つは、文字から直接意味に変換する処理(文字/意味変換:意味的処理に相当)を経て、意味から音への変換(意味/音変換)へつながり、その後発音へと向かう経路。もう一つは、漢字から字形に対応する音への変換(文字/音変換:音韻的処理に相当)から音の配列を構成して発音へといたる経路である。一方、カナ文字読みでは後者の経路(文字/音変換→音の配列)のみである。失語症の中に、カナや漢

字の音読に障害を示すが、漢字において音読が困難であるにも関わらず理解が可能な症例が見られる(宇野¹⁷⁾).

以上の見解は大きく分ければ、漢字の処理が直接意味的処理へと結びつく経路をもつとするか、自動化されたものであっても音韻的処理が形態的処理と意味的処理の間に介在するか否かについての差である。

本症例は、上述した一連の資料や実験が示した通り、音読が不可能な漢字であっても意味的な理解が可能であることを示していた。前者のモデルに沿えば、形態処理から意味的処理への経路は保たれていたが、形態処理から音韻的処理への経路上に問題が存在することとなる。また後者のモデルの場合、漢字の音韻的処理は自動化されていたとしても行われなければならない。だとすれば、音韻処理は行われたのであるが、本症例の場合音声発話に至る経路で何らかの問題が生じたこととなる。しかし本症例では音の配列や構音上の問題は見られない。そのため音韻的処理は行われたが、音声発話に至る経路に問題が生じたとする可能性を示唆する証拠はない。そこで本論では、漢字処理について音韻的処理と意味的処理の2経路を指定して以下の議論をすすめる。

漢字読みテストからは、本症例の漢字読みが学齢および知的能力から期待されるレベルに比べてかなり低いことが明らかとなった。また、漢字一文字の場合も熟語の場合もともに音韻的処理において見られる問題に比して意味的処理が良好であることを示した。

本症例の読み誤り分析から得られた資料は示唆に富むものであった。読みに対する反応に「筆」を「えんぴつ」のえん、「親」を「おやこのお」など熟語を想起し、それに基づいて読みを推測したと考えられる反応が多数見られた。また熟語から想起し、ただしく音読みが出来たものでも訓読みあるいは正確な意味を説明できないものが多数見られた。例：「油」を「じゅうゆ(重油)のゆ」。本症例の読みの誤りの資料は、読みにおいて熟語を手がかりとして多用していることを示している。また、母の報告からも本児は、日常生活においてよく目にする漢字熟語(安全・注意など)を理解し、読みを覚えることは容易であるのに、個別の漢字については困難があることが伺える。また、本人に行ったインタビューの中で、熟語の方が理解しやすいとの報告を得ている。

これは、熟語と漢字の有意味性の差によっているのかもしれない。通常熟語は、何らかの高い意味性を有している。一方、漢字一文字の中にはそのものとして意味の確定が困難なものがある(例：「文章」の「章」)。通常は、意味づけが困難であっても音韻的処理が可能であるので読みそのものは保たれている。しかし本症例の場合、音韻的処理が困難であるため、意味性の高い熟語の構成要素として呼び出しを行ったのかもしれない。

岩田³⁾、笹沼¹⁴⁾らは、脳損傷によって生じた日本語の失読失書は、カナの音読より漢字の音読がより保たれていることを示している。これについて笹沼¹⁴⁾は、漢字処理は単語レベルでの読みが文字レベルでの読みより深く学

習されていることが原因であると主張している。単語レベルでの処理と文字レベルでの処理は別であるとの主張は佐久間¹³⁾によってなされている。本症例が示した熟語への頻繁なアクセスは、漢字一文字と熟語の意味性の差によって生じたのではなく、単語レベルの処理と文字レベルの処理の差によって生じた可能性も否定できない。

漢字-音読み選択課題および音読み-漢字選択課題の結果は、漢字から音読みを再生出来ない漢字でも音読みの同定がある程度可能であることを示した。刺激として選ばれた漢字は、プリテストにおいて自発的には読みが生じない漢字であった。もしこれらの漢字と音読みの間にまったく学習が成立していないのであれば、正答率はチャンスレベルとの25%前後に落ち着くはずである。しかし、結果は両実験ともチャンスレベルを超えた正答率を示した。これについて2つの解釈が考えられる。一つは本症例の場合、漢字に対する読みは学習されているが、自発的想起が阻害されているとする。そのため、読みについての手がかりが与えられるような条件では、何らかの形で読み処理過程を促進し想起が可能となる。第二の解釈は、読みを提示されたことにより、その音を含む熟語を想起し、その熟語の中に当該の漢字が含まれているかを検討したとするものである。

長畑¹⁰⁾は、小児の読字困難として1.言語障害症候群、2.構音-書字障害症候群、3.順序障害症候群、4.視空間認知障害症候群、5.発達性純粋失読、6.その他の原因による読みの障害をあげている。本症例は、順序性障害症候群において見られる手指失認、左右障害および視空間認知障害症候群に見られる鏡文字の混同が見られた。

本症例は漢字や図形の短期的・長期的記憶ともに特別の困難を示さなかった。しかしながら、インタビューなどから見られるように漢字や図形を分節化し本人なりに意味づけし記憶再生を行うという方略を用いている。このような方略を用いることで、いくつかの視覚的検査において見られた視覚処理上の問題を回避しようとしているとも考えられる。本児は、ベントンの視覚記憶検査において図形に対して名前づけをしてそれをリハーサルするなどのストラテジーを用いて反応を行ったことが本人の報告から明らかとなった。

また、漢字の部首への分節化には問題は見られなかった。しかし、おなじ漢字単位(偏や旁)で筆順が安定しないことは、書字のための運動プログラムが十分に形成されていないことを示している。書字のための運動プログラムは、漢字字形の想起において重要な役割を果たしている(佐々木¹⁵⁾)ことを考えると書字プログラムの形成の不十分さは、本児の書字の問題と深く結びついている可能性は否定できない。

成人の失読・失書は獲得された言語処理過程が脳卒中あるいはその他の要因によって不全となった事例であるが、学習障害の読み・書字の問題を考えると有効な手がかりとなる。本症例を含む学習障害を示す症例は、文

字学習の途上にあり学習そのものに困難を示す。また、松本⁴⁾は本症例が形と音の対連合学習に大きな障害がないことを示した。つまり、本症例が漢字のような線画と無意味音を対として学習し、図形を見てその読みを想起することは問題がない。しかし、同じ報告において対連合学習における視覚刺激の提示時間が有意な効果を持ち、提示時間の短縮によって健常者との学習に大きな差が生じることを示した。また、本症例の心理テスト結果のいくつかは、視覚処理上の問題を示している。これは本症例の漢字学習がその視覚処理プロセスの問題によって引き起こされた可能性を示唆している。しかし、実際の学習において、視覚処理の問題がどのようなメカニズムにより漢字学習困難を作り出したかについてはまだ不明な点も多く、今後明らかにされねばならない。

最後に本人に対して行ったインタビューを掲載した。インタビューは、12歳9ヶ月時点で行ったものである。文字学習や本人に実施した実験について尋ねた。学習については数年前のことを尋ね、実験についても少なくとも1月以上前のものについて尋ねた。そのため、本人の記憶に曖昧な部分や不正確な部分もあるかもしれない。また本人の報告が自身の内的処理過程を正確に反映しているとも言えない。しかし、このような問題点にもかかわらず、これらのインタビューは学習障害を持つ子供の学習過程や認識を知る上で有意義な資料であると考えられる。

4. まとめ

本症例は、漢字の読みを想起することには大きな問題を示すがその意味的理解は相対的に保たれている。漢字の意味へのアクセスは前後の文脈からでも可能であった。また熟語の場合には、自発的読みが不能であっても読みに対応する漢字熟語を適切に選択することが可能であった。熟語の場合、読みそのものから意味が導かれるため、漢字からの視覚的意味処理の結果との照合が可能となり高い正反応率を示したと考えられる。

また、意味的理解は単なるカテゴリーレベルでの分類ではないことはあきらかであった。しかし、漢字についてどのような意味理解がなされているかについて明らかとなっていない。これについては、読みにおける誤りが間接的な資料となる。これらのデータは、単漢字が一旦意味性の高い熟語の構成要素として認識されていることを示唆している。

また前述したように本症例では意味/音変換は問題を示さないことから、読みが可能であった場合も漢字→その漢字を含む熟語→熟語の読み→熟語の音の分節化→読みという過程を経由した可能性が考えられる。

5. 付録

インタビュー。Mは著者、Eは本症例である。

<<ひらがなの学習について>>

- M: ---「な」と言う字があったとしたら、これどういふうに(して読んだの?)。
- E: 「な」だったら、字だけは見てるから、それでたしかこれがそうだったような気がするな。五十音表? 初めから「あ. . . た」「あかさた」(この時自発で五十音表の略図を書く)
- M: 頭の中に五十音表があったの?
- 中略-----
- E: いろんな字を思い浮かべてこれは違わないとかこれは違うとか。これはそうだと。

<<ひらがな書字>>

- E: (平仮名を)書くときはもう五十音表。
- M: 書くときは五十音表で書いてた
- E: たとえば「の」だったら、えーと、この字を書くとき。「のののの」そして「なにぬねの」。
- E: なにぬねの. . . で。こういうふうにしたして、あん、(五十音表は)書かなくてもいんだけど。はじめは書いてたけど、後から書かなくなった。
- M: 最初は、なにぬねの. . . て全部書いてみて
- E: あっ。この「の」だな。あーこれいけたぞ。
- E: それどんどん慣れていって今はやってないけどね。
- M: 最初のころはそうやってた。
- 中略-----
- M: 音と形あってるあってないは比較的良くわかったんだ。
- E: うん。

<<ひらがな単語書き>>

- M: ---「さかな」ってかきなさいって言われたらさかなの「さ」はこの字だったかなって思い出すの?
- 中略-----
- E: 五十音表を思い浮かべて。一の列(「あ」音の列のこと)だったら、一の列に例えば「さー」、「さ」と「か」と「な」があったなあ。(著者注: 「さ」「か」「な」は、すべて母音が「あ」の音であり、「あかさたなはまやらわ」に含まれていると言っている)
- M: じゃあ。「みみず」だったら、これはどうなるの。
- E: 「ま」だから、「まみ」。でしょ。ていうことは一の列(あかさたなはまやらわ)を基準にし、こうやって、うん、うん、うん。またおんなじく。「ず」は「す」を選んでそこにあのテンテンをつける。
- M: サ行の「さしす」
- E: ただテンテンと覚えとくの。テンテン、マル、テンテン、マル。あとさ、ちっちゃい「よ」とかあるしょ。「よよ」だったら(実際に書く)。「よ」。こっちはちっちゃい「よ」だったら、簡単に言えばこれをこうやってこうやると人が歩いている姿。(よの文字の上に人の線画を重ね書き)。だからちっちゃい

「よ」とおっかい「よ」がある。これがお父さん
 だったら、これが子ども。そういうふうな感じで大
 人と子ども。

M: さっきのさあ。みみずの時「み」でしょ。(五十音表
 の略図を指しながら)それであ行の時は「あかさたな
 はまやらわ」とイメージしてってこの音と字は
 合っている合っていないでやっていくんでしょ。

E: うん。

M: じゃあ。「み」のときはどうなるの? 「まみむめ
 も」って全部書くの? 頭の中で思い浮かべて一つづ
 つ調べていくの?

E: ううん。

M: 違うの?

E: 大体もうそこの列にきたら、すぐわかる。

M: ははあ。

E: 大体、その列にきたらもう、はじめはそうだったけ
 どだんだん慣れてくると、ああ、これだったら
 「まあ」(マ行の頭)。

<<漢字漢字の短期記名再生課題について>>

M: あのだ、前にさ。こういう字をみて書いてもらっ
 たっしょ。(漢字の短期記名再生課題)知ってる字
 は、ぱっと見てすぐ書けるじゃない。じゃあ、これ
 書けないとか難しいなという字が出てきたときは
 どうやって書いてた。パッとみて10秒。例えば、
 見せて1. 2. 3. . . 10とやったら。(「数」と
 という字を見せる)

E: あー。お米だね。こうついて(女をつける)、文章(文
 というの文字のこと)にノがついちゃった。(といっ
 て又の左肩にカタカナのノをくっつける)。

M: お米と女と文章のちょっと変わったと。

E: 文章(文という文字のこと)の頭が抜けてノがつい
 ちゃった。

M: じゃあ、他に複雑な奴はないかなあ。じゃあ、これ
 とかは、農業の「農」。(漢字を10秒間提示)。

E: 田圃の上に杭が刺さっちゃったね(農の上部を書く)、
 あ、こんなところに掘って小屋。あー。中に入っ
 てみたら誰か住んでたかなあ。

M: はあ。

E: これがさ。一つ屋根のさ。あ。だれか住んでたか
 がこうなってさ。あ。住んでた。お邪魔しました。田
 圃の。(聞き取り不可)

M: お話作るんだ。

E: 田圃の上に杭が刺さったなあ。

<<漢字読みについて>>

M: じゃあ、つぎいこう。前にこういうのやったしょ。
 漢字の読み方を教えてっていうの。こういう字を見
 て、これは作品で読めたけど、どういうふう読み
 方を思い出すの?

E: 思い出しかたというか、書き方というか。

M: 書き方でもいいよ。これ、ただ読んで下さいだよ。

-----中略-----

E: こうあるしょ。金槌と釘。(紙に描いて図解してくれ
 る。作の「にんべん」を金槌に見立て、隣の横線を釘
 に見立てる)品ていうのは、積木だったら積木の山と
 か。(四角い積木が積み重なっていると見立てる)

M: へえー。これ(作)見てもこれは金槌と釘で作だなと
 思って、これは品だな。

E: それは壁(作の隣の縦棒を壁に見立てている)

M: ほう。なるほど。じゃ、読めるやつ。これ(道具)はな
 んて読む。

E: ドウグ。

M: そう。道具。はい、じゃどうやって道具って読め
 る。

E: まず、これ(具)。

M: こっちがわ(具)。

E: これ(具)なんかさ。ジーツと見たらちょっと人に見え
 ない?。そしてこれ(道)が道具箱さ。

M: 二つ合わせて道具になるわけね。で具のほうが人な
 んだ。

E: まあ。そういうふう考えたの。

M: じゃ「王様」は?

E: 王様は簡単だよ。

M: なんで?

E: これね。王様っていうのね。王様っていうんじゃない
 んだ。ほんとに。

M: 違うの?

E: 大きい。大きい。大きい人。(王の上に人を重ねる)

M: 大きい人が

E: ちっちゃい人がいます(様の傍の下の部分)。そして
 うし(聞き取り困難)はてな。はてな。はてな(様の傍
 の上部)。だったとするっしょ。でも逆らったら危な
 い。やられるから。その後つけて。(聞き取り不
 可)。だから、はてな、はてななんだ。

M: これ(様の傍の下の部分)が、はてな、はてなのとこ
 ろ。

E: それ(王)が大きい人。

M: それでこっち(様の傍の下の部分)が?

E: ちっちゃい人。それでここ(様の偏)は木と考えてもい
 い。木でもこんなもん。

M: あー。なるほど。

E: ね。そして、ここはなにになにだな。

-----中略-----

M: あと一つだけ。(「教室」を見せる)

E: 教室っていうのはね。これはね。これ(室)は四角い部
 屋。ここに教師。

M: 室が四角い部屋なわけだ。

E: もう面倒だから。...

M: はいで。

E: そいでここに生徒。教師。ここはブラックボード。
 そしてここに戸があります。ウインドウ。(室を教

室を上から見た図に見立てる)

M: それじゃこっち側これは(教を指さす).

E: それは教師.

M: これ(教)が教師, これ(室)がこの全体が室だな.

E: それは室さ.

<<漢字書字学習について>>

E: あっ. 小学校の頃ね. 山だったら, お手のもん. 山でしょ. 谷でしょ. 川でしょう. (漢字を書く)
山はこれにこう付けて. 両方だったらこうやるとか山にして.

M: これは読む時? 書く時?

E: 読むときとかね. 谷っていうのは小学五年ぐらいでやっと覚えたんだけどね. (山・谷の漢字に線を書き加えていって絵にしている)

M: じゃあ, 「山」っていう形を作ったり, 谷に形を付けたりしたんだ? でもさ, ものによってはさ. 形になりにくいものもあるじゃない. そういうのはどうした.

E: そういの. 覚えてない.

M: じゃ火は? 火は形になりやすいか. それでは, 「心」は書ける.

E: (正確に書く)

M: こころは何で書けるの?

E: こうやってやったら心臓でしょ. (心の文字に線を加えて心臓の形にする)

M: なるほど.

E: あと湖だったら(自発で湖という字を書く). これをさ山にして(古を山に見立てる), これは波でさ(サンズイを波に見立てる), これ(月)はよるの月. 昼間でも突き出てるから, 簡単に言うと. 湖がこういうふうにかから川が流れてたとするでしょ. したら波が風にね. こういってるときに三日月の月はこうなって太陽はここにこういうふうにてってると.

M: 山は?

E: 山? 山っていうか, これは湖を表しているものなのさ. これが湖. こっからこう曲がって. ま, こういう地球の地の一つ.

<<左右の認識>>

E: あっ, 今はね. いまちょっと両方使いやすくなってけどね. マジな覚え方っていうのは, 使いやすい方を右って考えるの. あの右利きだから, 使いやすい方が右, 使いづらい方が左.

M: それで覚えてたんだ.

E: 今は, スポーツとか両方使わないとうまくできないから, 左も使うようになってきたから.

M: 前に, 右あげて左あげてっていうゲームをやったじゃない. あのときは, 右あげてっていわれるとどうやってたの?

E: 右挙げてっていわれると, 使いやすい方確かはこっ

ちだったかなあ.

M: じゃあ, 左挙げてっていわれると使いにくいほうはっていって挙げてた? もう今は右左といわれるとパッパッ挙がる.

E: うん.

-----右手挙げて, 左手挙げてのゲーム-----
問題なし, 的確に行える.

<<漢字熟語読み課題について>>

M: こういう漢字(新学期)の読みはどうやって思い出したの, パッパッ出てくるの. たとえばこれ.

E: 新学期. あたらしい, 新聞の「新」に学級の「学」. ここにあるのは大体よめる.

M: じゃあ. これがバラバラになったときにもよめる. 全部. たとえば, 「火星」という一まとまりの時が読みやすいか, バラバラの方が読みやすいか.

E: これ(火)なかったらなにかわかんないよ. だって水星, 金星, 冥王星. 水金地火木土天海冥のあるのなかのどれかわかんないよ.

M: でも, 星ってよめるしょ.

E: でも, 星って答えても何星ですかってわかんないよ.

M: これは(板: 黒板の「黒」を隠して「板」だけ見せる)?

E: バン. これだけだったらわかんないよ. 吸盤とか. これは違うけど.

M: 漢字一文字がぼこっと出てくるのとかいう風に熟語になってるとどっちがわかりやすいかな. たとえば学校の「学」だけ出てくるときとか, 「校」だけ出てくるときとか, 宿題の「宿」だけ出てくるときとか.

E: はっきり言ってつながってる方が読みやすいよ.

M: つながってるときの方がこれどっかで見たなっていう感じがするんだ.

E: うん.

<<熟語意味理解テストについて>>

M: まえにこういうのもやったじゃない. 「おとうとがいつまでもかえってこなかった. かなり()した.」これさ, 一つ一つの字は, これを(実施)したところには読めない漢字なんだ. でも,

E: でも「かなり上達した」ってことはないでしょう.

M: そうかなりよくできたの. それで聞きたいんだけど, 読めない漢字もたくさんあるはずなのに正しい漢字を選ぶことが出来たの. たとえば, これなんて読む.

E: 創造力(でよんだ). あのさ, 「いちごのしゅうかくがはじまった」(という第一文がある.)っていうと, 「海」っていう漢字でもない, 「島」っていう漢字でもない. 「箱」って漢字でもない. となるとすぐにこういうふうにかつたんだけれど, なんかね. ここの初めのやつ(第一文)で, あっこれだなこれだ

なっているふうになんか。

M: でもさ、「今日は祝いだ。父は()から酔っぱらっている」のこういうときは。

E: 父は先週(選択肢の一つ)から酔っぱらっている。そんなことあるわけないでしょう。父はなにからっていったらこれでもないこれでもない(誤選択肢を指さす)っていったらこれしかない。あんまりわかんなくないと、こうすぐに見てこれしかないってなっちゃうから。

-----中略-----

M: これ読める(「画家」を指さして、文章全体は隠す)

E: んー。(読めない)

M: これさ「ぼくはピカソをととても尊敬している。彼こそ、世界一の だとおもっている」

E: 画家ね。(読める)

M: これさ、いま聞いてたら読めなかったしよ。

E: いや思い出せないだけさ。

M: 思い出せないだけか。そうするとそうかこういう(前後の文章)があると、画家っていうのだとおもうから、そうだそうだってわかるんだ。

E: まあそういうこと。前の文章が読めればすぐにこういうのはわかるの。ただね。中学校の漢字の方が難しいから前の漢字あんまり覚えてない。あんまり思い出さずことしないから。中学校の漢字覚えようとしてるから。

M: じゃあ、これ(漢字)だけだと思い出せないけど、こういうふう(前に文章がある)にあれしてると、あっそうだそうだって思い出しやすいくなる。なるほど。じゃあ、回答したときにはなんていう読み方をするかは分かった。

E: うん。

<<熟語完成課題>>

M: ひらがなの熟語に対応する漢字を2つ選んで下さいという課題でした。それでこれもかなりよくできたと思うんだけど、「でんち」っていわれて、あっこれとこれの組み合わせだっていうのはすぐ分かった?

E: うん。なぜか、それが聞きたいんでしょ。「でんち」「でん」がついてるとすると、「でん」はこち(伝)とこっち(電)2つある。でもこっち(伝)は伝説。こっち(電)は電気。ていうことはこっちだ。あと「ち」をつなげて電池。ていうことはこっち(知)じゃないからこっち(地)。

M: でもこれ(知)もこれ(地)も「ち」だよ。

E: 「ち」はちでも違う。

M: じゃあ「開店」は?

E: 「かいてん」ていうのは、これ(開)も「かい」って読むんだけど、「かい」かこっち(貝)は。かいでしょ。かいでしょ。こっち(貝)はあの、二枚貝とかの貝殻を表すのに使うからこれは絶対違う。では

「てん」はどっちか(点、天)。空ではないしものを売るんだから店ということで、店。

M: じゃあ「天気」も

E: そう「てん」はてんでも書いてん(点)じゃなくて、空のてん(天)。「き」っていうのは「木」じゃなくて、気象情報とかの「気」。天気っていうのは空の、まあ、気と書くから、空は空で「てん」は「てん」で絶対こっち(天)しかない。「き」っていうのはこっち(木)じゃあわない。意味も違う。

M: じゃあ、これね。これは間違ってたの。「関係」。どう間違ってたのかというと選んだのは合ってたんだけど、順番が間違ってた。どうして間違えたと思う。

E: これはたぶんね。関係でしょ。どうして間違えたかという。その時に、たぶん、これを逆に覚えてたと思う。関係とかそういうのか何だけど、急いでいたか何かして関係で分かってたんだけど間違えた。順番間違えてしまっただけなんじゃないかと思うけど。

M: これ(物語)も同じ?

E: うん、たぶん。ものがたり。うんたぶん。

M: じゃあさ。どっちが「もの」でどっちが「かたり」かなーっていうのがわかんなかったっていう意味。一つにして覚えてたの

E: もの(物)ていうのと、たぶんその時も「物」っていう字だけは分かってたんだ、覚えてたんだ。かたり(語)は分かってなかった。それだから今は、中学に行く前にすこしは勉強したから今は分かっているんだけど。その時は、これ何年の時やったんだろうな。

M: 中学入る直前ぐらい。

E: だからその時はどうでもいいやと思っていたのかもしれないけれど。はやく終わらせて遊びたいとか思ってたんだらうけど。たぶん、いそぐと今でも間違えることが多いんだよ。急いでなきゃ、あってるんじゃないかなあ。

<<意味関連漢字選択>>

M: これは意味の関係ある漢字を選んで下さいというやつね。ずーっとあってたんだ。こういうのは簡単だった。

E: うん。

M: これ(高低)は反対の意味だってすぐ分かる。

E: うん

M: 読みを思い浮かべなくても

E: うん。だってね。これ、どうしてかっていうとね。天気予報で高気圧です。低気圧です。うっせえんだ。

M: じゃあこれは(水・油・立・筆・思)

E: これ、これはどういう問題だったの。

M: これ(水)と関係あることばを探して下さい。

E: じゃあ これ(油)しかない。

M: どうして

E: これ(立)は立つという意味。人間が立ったって水には関係ない。こころ(思)っていったって水には関係ない。えんぴつ(筆)ってたって水には関係ない。そうしたらこれ(油)しかない。

M: これ(筆)なんて読む。

E: え。えん。

M: ほんとはこれ(筆), えんぴつの「ぴつ」の方。

M: これは(横 母・縦・橋・中)

E: これ, ただ, よこ(横を指さす)たて(縦を指さす)とか覚えてたの

M: これは(胃 前・向・腸・火)(以前に正しく回答できた)これ(胃)とこれ(腸)なんだけど。読み方分かる?

E: 月にこれだから(指で空中に文字を書く)

M: (Eの胃を指さす)胃さ。これは(腸)もっとしただよ。

E: 腸。胃腸だ。

M: 身体の部分を表す言葉には月がついているの。

E: いやいまね。出てただけとあーでない。

M: (孫 守・月・親・引)を見せてこれ(孫)は分かる

E: うん。ケイ(おそらく係と間違えているのであろう)。

M: ケイかな?

E: ケイ(といいながら首を傾げる)。

M: じゃこの中(選択肢)の中のどれが関係してる。

E: なんか違うような気がするな。ケイでこれだけじゃない。(といって孫の偏の部分隠す。つまり系をみせる)。

M: ここ(偏)が違う。これ(系)だけでもケイと読むけど。ここ(偏)に違うのが来てる。だからこどもが入っているのだから子どもの子どもさ。

E: 孫

M: そうそう。孫。

M: こういう問題は簡単なんだね。あそうか。これじゃないこれじゃないといって答えたのもあったんだ。

E: 迷ったのもあったし、

M: じゃあ、迷ったのをと(不正解の問題を取り出す)(守 空・園・攻・商)

E: あ、迷ったってということは、これに関係あるんじゃないかとおもって、それでこれに関係あったかなと。多分にこれ(守)にはこれ(攻)だと思うんだ。

M: 正解。これは守でこれは攻めるだ。

E: 今は分かるんだ。でも漢字とかが似てるから、これかなこれもそうだけど。これかな? って。たぶんここが似てるから(同じ字冠)そういったんじゃないかなあ。迷った末にただ上に冠があったからそれにしちゃったんじゃないかな。

M: じゃあこれは(空 星, 仕. .)

E: これでしょ。(ただしく星を選べる)たぶんこれに星っていう字を忘れてたんだ。そうするとこれ(星)を「ふるさと」って読んでたのかもしれない。

- (1) 御領謙 読むということ 認知科学選書5, 東京大学出版会, (1987).
- (2) 井上道雄 漢字の形態処理, 音韻処理, および意味処理の関連性について-形態マッピング課題を用いて-, 心理学研究, 51, (1980), 136-144.
- (3) 岩田誠 脳とことば -言語の神経機構- 共立出版, (1996).
- (4) 海保博之 漢字意味理解抽出過程 徳島大学学芸紀要, (1975), 1-7.
- (5) 海保博之 漢字情報処理規制をめぐって 計量言語学, 11, (1979), 331-340.
- (6) Lyon, G. R. Identification and remediation of learning disability subtypes: Preliminary findings. Learning Disabilities Focus, 1, (1985), 21-35.
- (7) 松田実・生天目英比古・中村和雄・鈴木則夫 「手」と「紙」は読めても「手紙」は読めない-左側頭葉障害による漢字の失読失書の1例- 神経心理学 13, 4, (1997), 20-29.
- (8) 松本敏治 漢字読字・書字に困難を示す症例の読み学習について 日本特殊教育学会第36回大会発表論文集, (1998), 826-827.
- (9) 水野りか 漢字表記語の音韻処理自動化仮説の検証 心理学研究 68, 1, (1997), 1-8.
- (10) 長畑正道 学習障害の神経機構 小児医学, 17, 5, (1984), 739-769.
- (11) Perfetti, C. A., & Zhang, S., Very early phonological activation in Chinese reading. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 21, (1995), 24-33.
- (12) 斉藤洋典 漢字と仮名の読みにおける形態的符号化及び音韻的符号化の検討 心理学研究, 52, (1981), 266-273.
- (13) 佐久間尚子・伊藤元信・笹沼澄子 プライミング・パラダイムによる漢字単語の認知ユニットの検討 心理学研究, 60, (1989), 1-8.
- (14) 笹沼澄子 読みの過程の普遍性と言語特異性-失語症者の障害パターンから 大津由紀雄(編), 認知心理学3 言語, 東京大学出版会, (1995), 193-208.
- (15) 佐々木正人 記憶とからだ 伊藤正男・佐伯胖(編), 認識し行動する脳-脳科学と認知科学-, 東京大学出版会, (1988), 238-258.
- (16) Tan, L. H., Hoosain, R., & Peng, D. L., Role of early presemantic phonological code in Chinese character identification. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 21, (1995), 43-54.
- (17) 宇野彰 失語症の障害メカニズムとアプローチ 運動生理, 5, 3, (1990), 157-162.

心理治療に現れる対人関係

前田 潤*, 松本 敏治**

Interpersonal-relationship in psychological treatment

Jun MAEDA and Toshiharu MATSUMOTO

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

We followed in this paper the premise that the psychotherapy or psychological treatment was the interpersonal support technique operating communication. In consideration of this, we focused on the negative transference and the logical types learning theory by Bateson, G. and examine the role of negative transference in the psychological treatment. Then we presented two cases who show negative transference. We examined the interpersonal relationship represented in those cases. After that, we discussed the feature that was constructed by the transference and the role of negative transference in relearning of learning II in those cases. Through the discussion, it was suggested that the transference situation could provide the field of relearning about learning II in the psychological treatment. It was revealed the importance of the neutral attitude of clinical psychologist in the transference situation as the field of relearning.

Key words : psychological treatment, negative transference, relearning

1. はじめに

心理療法では、継続的に面接を重ねて行くと、対象者が心理臨床者にとって謂われのない（と思われる）攻撃心や怒り、非難、疑い、なじむなど、陰性感情に基づく行為をあからさまに向けてくることがある。こうした現象は、古くから陰性転移、あるいは陰性感情転移として、よく知られている現象である。治療者は、対象者の振る舞いを陰性転移として理解しようとする一方、対象者は陰性転移という概念を知ることにはない。仮に知っていても対象者にとっては正当な理由を持って、そのような陰性感情が沸き起こるのだ、と考えるのが自然であ

る。心理臨床者は、心理臨床者からすると、理不尽な対象者の振る舞いと格闘しながら、有り得べき援助にむけて模索を強いられる。対象者から見れば、心理臨床者に援助を求めながらも、心理臨床者が格闘しなければならなくなるように、対象者は振る舞わざるを得ない。ここに苦しみがあることは、想像に難くない。それゆえ、心理療法の経過中に、対象者から陰性感情を向けられ、そのような対人関係パターンが出現するとき、心理臨床者は、心理療法にとって、ここが一種の展開点だと意識する。いわゆる「治療（treatment）」の時だと、より一層の慎重さをもって取り扱おうとする。

援助を求めながら、援助者であるはずの心理臨床者を苦しめ、自らも苦しむような対人関係パターンの出現が、心理療法に於ける援助行為にとって、どのような意味と役割を持つと言えるのだろうか。

本論文は、人が何らかの不適応にあるときには、対人

* 伊達赤十字病院

** 共通講座

関係レベルでも不適応が現れ、この対人関係に現れるようなレベルに対する働きかけが、何らかの形で再適応を助長、或いは阻害する、という心理療法の前提に従う。その上で、心理療法を、再適応へ向けて営まれる対人関係レベルにおける再学習事態と捉え、再学習事態についての陰性転移の意味と役割を、具体的事例を通じて検討することを課題とする。

2. 心理療法の基本構造からみた陰性転移

まず、心理治療の展開点をなす、と思われるときに出現する対人事象について考える前に、心理療法の基本的な構成と、構造を明らかにしておく必要がある。その後、陰性転移の心理療法における位置付けを行う。

心理療法は、広く言えば心理学を基礎学問とする、対人援助の実際的かつ具体的活動だと言える。対象領域は極めて広く、人における、なんらかの不適応が発生する領域の全て、と言えるほどである。但し、不適応にある本人の動機づけが低ければ、当然、本人は心理療法の対象となりにくい。こうした本人の動機づけが問題になるところに、心理療法の特質の一つが現れている、と言える。そして、心理療法は、身体や中枢神経系に侵襲することなく、専ら心理臨床者と対象者の間で図る、コミュニケーションを通じて行われるものである。それゆえ、心理療法とは、心理臨床者と対象者に現れてくる、対人関係に於けるコミュニケーションの操作を通じて、対象者と共同しつつ図る対人援助技術である、と言える。

対人援助である以上、対象者の利益につながるものが、専門家として当然問われている。陰性転移と名付ける対象者からの言動や行動は、一般的に見れば、心理療法の継続自体が対象者にとって不利益になっている、という認識に対象者があることを示す。それゆえ、対象者の利益の増進が、治療というものに求められていることを考えるならば、心理療法において陰性転移と名付けた現象は、心理臨床者にとって深刻な事態とならざるを得ない。但し、心理臨床者は、自らの職の要請として、援助方策を組み立て、専門性に基づく働きについて、常に意識しながら対象者と関わっているのである。対象者にしても、陰性感情が沸き起こるときには、時に行動化しても、面接に継続的に現れ、またはさらなる面接の継続や面接時間の延長を求めるなど、援助を求める姿勢を崩さない。崩さないどころか、深めているかの如き態度と行動を同時に示すのである。

先に述べておくと、この奇妙な対人関係パターンは、決して、心理療法経過中にだけ見られるような特別な現象ではない。しかし、対人援助を専門とする心理臨床家達は、職の要請にのっての深刻さから、この奇妙な現象を転移や感情転移として、格別に問題化し、取り上げてこざるを得なかった。

そこでまず、一般的に承認されていると思われる、転

移の扱いの心理臨床者としての基本的留意点と、転移の成因的理解について述べる。そして、心理療法とは、コミュニケーションを通じて、対人関係パターンの再学習を図り、再適応を促そうとする試みである、という立場から、転移と再学習事態との関わりについて述べたい。

3. 転移と学習理論

転移は、現象として着目されてから、今日に至るまで、多くの専門家がこの現象と格闘し、理解に努めてきている。それゆえ、転移について論じようとするとき、本来は転移の定義や概念の歴史の変遷について、文献的に総覧し、その上で、現在の意味での転移に関わる問題と、課題とを明確にしながら、検討すべきであろう。しかし、本論文では、心理療法を再学習事態と捉え、再学習と、このときに出現する、対人関係パターンの関わりについて検討することを課題とする。それゆえこの課題にとって必要な、力動精神医学的観点における、転移の取り扱いに関して一般的に承認されている留意点と、転移の成因についての一般的理解を提示するに留めたい。そして、次に、転移と学習とが、どのような関わりとして捉えることが出来るのか、グレゴリー・ベイトソンの論理階型学習理論に従って検討したい。

3.1 転移についての一般的理解

転移についての定義は様々なものがある。一般的には過去の重要な人物（両親など）との間で経験された感情や観念や行動が、現在の人物（心理治療者など）に向けられる現象で、このような置き換えに対して、対象者自らは無自覚、無意識的で、むしろ行動として反復されるような現象、というのが妥当な理解であろう。

先に触れた、陰性感情を心理臨床者に向ける現象は、陰性転移と呼ばれる。逆に陽性感情を向けられることも、時に治療を阻むことがあり、この場合は陽性転移と呼ぶ。陽性感情を、陽性転移として、治療を阻む要因とすることは、一見不可解であるかもしれない。しかし、謂れのない陽性感情は、発展すると、恋愛感情にも似た情熱が込められてくる場合がある。力動精神医学史の教えるところによれば、対象者が想像妊娠までしてしまい、危険を感じた治療者が、婚約者と逃げ出し、治療関係が破綻した事例が存在する（1）。これほど劇的なことでなくとも、陽性感情に基づいて対象者の願望を満たしてばかりいると、背後にある陰性感情を結果として扱えなくなる。そして治療者に向けられる攻撃性が第三者に向けられる。また潜在的な陽性転移は、表面的に良い関係が延々と続くが、なにも改善しないという事態を引き起こす、ということは、良く知られている問題点である。

こういう観点からも治療者に向けられる転移は、治療の正否を握る、重要な現象と看做されていることがわかる。そして、そこでの治療者に求められることは、中立的な態度（なぜそのような訴えをするのかについての判

断を保留する態度)を持つと共に、空想の人物と、現実の治療者との相違に気付いて貰う役割とを使い分けることである、と言う(2)。

それでは、対象者自らは無自覚、無意識的である転移はなぜ起きるのか。これについてフロイトは幾つかの論文で考察している。そしてこの場合重要と思われる第一は、過去の親子関係において学習したパターンが自動的に反復される、との観点(3)であり、第二は、能動性の獲得という観点(4)、第三は、想起されない記憶が反復して行動化される、という観点(5)である。

まず第一点は、早期に持った対人関係パターン(これが通常親子関係であることは自明)が印刷原版となつて、その後に展開される対人関係で繰り返される、それが転移という現象の基礎にあるのだ、との考え方である。しかし、良い親子関係のパターンが、その後の対人関係パターンを基礎づけるのであれば、適応的と言えるのだが、不幸にして早期の親子関係が劣悪な場合もある。これが、その後も持続的に対人関係を基礎づけるのであれば、不適応を繰り返すことになり、なぜわざわざ不適応を繰り返すようなパターンを保持し続けるのか、という疑問も生まれる。また、自分が被ったことを逆にする側になる、という現象を説明することはできない

(6)。これに対して、快感原則に相反すると思われる外傷性神経症、戦争神経症を契機にしながら、反復それ自身が快を生むこともある、という指摘とともに、反復的に行う幼児の糸巻き遊戯(「fort-da」の遊戯)の観察から、遊戯の持つ意味を、体験の受動性から遊戯の能動性に移行すること、不快な体験を玩具や遊戯仲間に加えることで、この代理に復讐を果たすことに見ている。つまり、対人関係において印刷原版を繰り返し使用する、というだけでなく、能動性の回復と復讐という、反復強迫における、主体にとっての積極的側面を指摘していることになる。この考え方からも、不幸な、或いは、不快な体験を受動的に被らざるを得ない経験が多ければ、それだけ、そうした関係のパターンを反復するようになることが推察される。

しかし、治療場面で、対象者が、これこれこういうことがあって、それで自分はこういう意味で、現在の対人パターンを作り上げているのだ、と述べることはない。幼児時代のごく初期に起こったもので、当時は体験しただけだったことが、その後になって、それを理解し、解釈する、ということは不可能である。対象者は、むしろ、思い出すのではなく、行動に表わすことで再現するのだ、と指摘する。つまり、なぜそのように振る舞うのか、本人もその起源からは、切り離された状態にあると云うのである。それが、いわば強迫たる由縁でもあるのだが、この強迫性は、起源から切り離されているだけでなく、起源を抑圧することで、一次不安から防衛されている面もあると云う。いずれにしても、不適応を招く行動や症状の起源は、歴史的事態ではなく、現在も現実の力を有するものであり、転移はそれ自体が反復の一部分

であるので、あらゆる場面で反復される。そしてそれは、当然、治療場面にも再現される。それゆえ、心理治療者は、この行為化する反復強迫を制御し、記憶を呼び起こす手がかりとして、転移を治療操作の対象としてこれまで位置付けてきたのである。

3.2 転移と学習理論

心理療法を、コミュニケーションを通じて行われる対人パターンの再学習の場として捉えたのは、分裂病の成因論としてダブルバインド仮説を提出した、グレゴリー・ベイトソン(以下ベイトソン)である(7)～(10)。ベイトソンは学習というものを階層的に捉える。

ベイトソンの学習についての基本的考え方は、学習は何らかの変化を差し示しており、その変化には階層がある、というものである。そして、変化の階層によって、ゼロ学習、学習Ⅰ、学習Ⅱ、学習Ⅲ、学習Ⅳと階層づけていく。

ベイトソンによれば、ゼロ学習の特徴は、反応が一つに定まっている、というもので、例えば「慣れ」の形成である。学習Ⅰとは、反応が一つに定まる定まり方の変化で、例えば「慣れ」の消失である。一般に実験室で「学習」というときには、この学習Ⅰのレベルの学習を扱っている、と云う。学習Ⅱは、学習Ⅰの進行プロセス上の変化で、学習Ⅲは学習Ⅱの進行プロセスの変化、学習Ⅳは、学習Ⅲの進行プロセスの変化、ということになる。今ここで重要なのは、この学習Ⅱと学習Ⅲに関わることである。

ベイトソンによれば、学習Ⅱとは学習Ⅰに生じる変化であり、「行為と経験の流れが区切られ、独立したコンテキストとして括りとられる、その括りとられ方の変化。その際に使われるコンテキスト・マーカーの変化を伴う」のが、学習Ⅱであるということになる。

ベイトソンは、学習Ⅱが綿密なデータの中に姿を表わしているケースが幾つか確認されている、と云う。ベイトソンが挙げているケースは、ハルが行った人間の反復学習の量的研究、ハーローがアカゲザルに行った「類の学習(Set Learning)」、ビターマンの「逆学習(Reverse Learning)」、パブロフの「神経症生成実験」などである。これらの実験結果は、学習課題のコンテキストへの適応、「学習の仕方の学習」によって説明されるべきものであると云う。そして、人間関係の場で学習Ⅱの現れる現れ方は、とても列挙し尽くせないほど多岐に亘る、と指摘し、その中の一つに心理療法の場に現れる「転移」を挙げるのである。

それはどういうことか、少し詳しく見てみたい。

たとえば、A、B二人の一連のやり取りを考えるならば、Aの一つの行動は、Bの行動にとっての刺激でもあり、反応でもあり、強化でもある。

それは

・・・ ai-1 bi-1 ai bi ai+1 ・・・

aiは bi の「刺激」

aiは bi-1 の「反応」で、その反応を bi が強化

aiは ai-1 の反応である bi-1 への「強化」

という具合である。

一つの行動が「刺激」でもあり、「反応」でもあり、「強化」になり得る、というだけでなく、Aの行動は、それ以前のAの行動に対する反応であるかもしれないし、強化になっているかもしれない。こうなると二人の人間の間で続いているやり取りを組織化しているのは、実に双方各人の捉え方において他ないということになる。各人がこのやり取りをどのようなコンテキストから、どのようなコンテキストのやり取りとして捉えるのか（括り取るのか）、ということにやり取りの成立がかかっている。そして、やり取りの成立は、こうしたコンテキスト構造の、A、B間の暗黙の了解が成立している場合に限られてくる、とベイトソンは指摘するのである。

学習Ⅱにおいて習得するのは、経験や出来事を括りとり方なので、個々の経験を意味づける構えや見方のようなものである。それは一旦身につけると、個々の出来事などによって修正されることが非常に起こり難い。それというのも、身につけた括りとり方や見方に全体が収まるように行動をしていくような性質のものだからである。

この学習Ⅱの性質から考えると、転移は、過去の学習Ⅱにまつわる諸前提に従って、心理臨床者と対象者のコミュニケーションを形づけようとする働き、ということになる。そして、学習Ⅱの成立を考えるならば、それは幼少期に起源を持ち、そうしたコミュニケーションの括りとり方が発揮されていることは意識出来ても、どのように成立してきて、その成立にどのような手がかりが使われたのかは、そもそも意識出来ない性格のものなのである。このような考え方に従うならば、抑圧や抵抗などを想定しなくとも、転移に関わっている学習事態は、そもそも学習の成立の起源を想起できる類いの学習ではないということになる。

ベイトソンの階層型の学習理論によれば、学習Ⅱのレベルでの学習の変化に関わるのは、学習Ⅲであるが、学習Ⅲのレベルの変化が起こらなくとも、学習Ⅱのレベルにある前提の入れ替えは可能である。それゆえ、ベイトソンは、心理療法に於ける治療目標を、対象者が学習した学習Ⅱのレベルでの諸前提、出来事に対する構えや見方の入れ替えの挑戦にある、と定義するのである。しかし、個々の出来事や経験が、学習Ⅱのレベルの学習を変更させる手がかりにはならず、さらに、それらの諸前提はそれ自体を妥当化する働きをもつことを考えるならば、心理療法の目的に到達するのは至難の技であると

言える。それでも、ベイトソンが主張するように、このような学習Ⅱの諸前提の入れ替えは可能であり、多くの心理療法の臨床例が示すように事実に成功例もあるのである。

4. 陰性転移の具体例

それでは、問題として取り上げようとしている陰性転移が、実際の心理療法の場面で、どのような形で生じているのだろうか。次に具体例を詳しく見ることで、陰性転移が心理臨床者と対象者にどのような対人パターンを作り上げ、対人関係の再学習にどのように関わっていると言えるのか、検討することにした。但し、事例の性質上、個人が特定できないように、重要な点以外は脚色を施す。

4.1 事例1

事例1をなすのは、男性てんかん患者である。心理臨床者と患者との出会いは、患者の成人にあたって、該当科が、小児科から精神神経科に移行することになるので、その橋渡し役としての関わりを精神科医から依頼されたことにある。

4.1.1 家族構成など 初対面当時、患者は19才独身で、両親は患者が16才のときに離婚したため、父親と弟と患者の3人暮らしであった。

4.1.2 家族歴 特筆すべきものはない。

4.1.3 既往歴 てんかんの他、小人症の既往がある。しかし成人近くなった患者は中肉中背の平均的体躯の持ち主であった。他に特筆すべき既往はない。

4.1.4 現病歴 生後間もなく、てんかん発作を初発。以来、てんかん発作のコントロールのため、度々小児科を入院している。生育し近郊の高校に入学。高校在学中も学校或いは通学途中で発作を経験し、入院することもあったが、患者の服薬に関するコンプライアンスは比較的良好に保たれており、発作頻度が減じている。スポーツなどの場面で、協応動作にアンバランスさが見られ、巧緻性が求められる細かな動作では不器用さが認められる。高校卒業後、時にアルバイトをすることはあるが、定職に就けず、収入につながらない家事を担うことが専ら患者の義務となっていた。成人にあたり小児科医の勧めによって心理臨床者と面接をしながら、精神科への移行を準備する事となった。

4.1.5 事例の提示 心理臨床者は、月に2回程の外來通院の度に面接をし、患者と共に精神神経科病棟におけるレクリエーションや行事への参加を繰り返した。

面接を開始して2ヶ月ほどして、小児科から精神神経科への移籍が小児科医主導の下で具体的に進められている間に、発作のため患者自ら救急車を呼び、小児科に搬送され、小児科に入院になるということがあった。入院生活には至って慣れている風であり、入院中、退屈なときには、患者自ら心理臨床者の下を訪れるようになっていた。

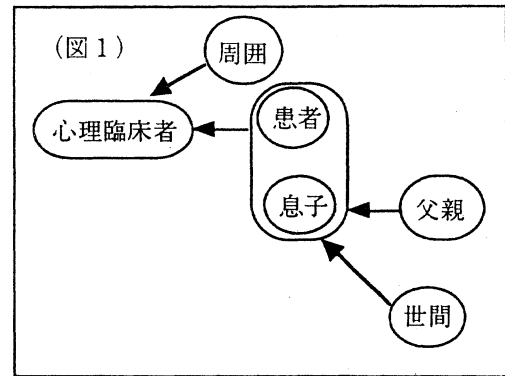
退院後、精神神経科に籍が移り、初めての精神神経科への通院日に父親が同伴し、心理臨床者も父親と同伴面接を行う機会を持った。このとき患者はいつもと違って変わって無口であり、消え入るような面持ちで居心地悪そうに父親の傍らに座っていた。父親は、本人にも協力的であろうとする姿勢も示していた。

それから、精神神経科通院日には継続して面接を重ね、小児科退院後、約半年が経過して、発作のために初めて精神神経科に入院となった。心理臨床者は、休日以外ほぼ毎日、精神神経科病棟を訪れているので、時間などの約束なく、患者の居室にも顔を出すようにしていた。

患者が入院となって1週間が経過し、いつものように訪れると、患者の姿が居室にも病棟にもなかったため、その日は会わずに帰った。次の日、患者は心理臨床者を見つけると、他の大勢の患者の前で、昨日待っていたのに現れなかったことを悔しき混じりに訴え、心理臨床者を非難した。事情を伝えながら、謝罪もし、以後、時間を決めて、会う約束をしたが、この日を境に患者は、ことある度に、心理臨床者に、非難めいた言動や、挑戦的、且つ小馬鹿にしたような態度を示すようになった。レクリエーションや病棟での様々な場面で、他のスタッフを引き合いに出しながら、如何に心理臨床者が、手を抜き、やる気を示さず、全力を出さずにいるか、それは心理臨床者が自分を馬鹿にし、ひいては精神神経科患者の全てを馬鹿にしているからに他ならない、ということ为例証しようとするのが続いた。一方「俺は人に馬鹿にされるのが嫌いだ」と言いながら、レクリエーション場面で心理臨床者がミスをした、テーブルゲームなどで患者自身が考える最善の手を下さなかったりすると、「今のはどうしたんでしょうね」と揶揄して憚ることがなかった。

それとは別に、一対一の場面では、悩んでいるような様子を見せ、どうしたのか尋ねると、高速と音速の違い、絶対0度はなぜ-273度なのか、等の、心理臨床者としては、なぜそれが患者にとって、今、ここで解かねばならない問題なのか分からないような、思弁的な問題を最大の関心事であるかのように話し、尋ねてもさらに問いを重ねるような返答しか返って来ず、心理臨床者にも考えるよう強いた。一緒にいても、心理臨床者は、途方に暮れる所もあるが、患者は次回面接予約を忘れずに入れ、都合で会えないときには落胆して見せるのであった。

集団場面での、患者の心理臨床者への挑戦的、且つ小馬鹿にした態度と、何が本来問題になっているのか、心理臨床者には分からないような内容を話題としたまま、面接を求める患者の態度に曝されているときに、心理臨床者は身体的変調を来した。本人にとって必要な方策も、見通しも立たないと感じるままに、面接は継続し、患者は退院となった。退院後も通院の度に、心理臨床者と面接を重ね、その中で、頭痛や腹痛など身体症状



の訴えと共に、家族との日常的なやり取り、将来への不安について、やはり時に心理臨床者を小馬鹿にしたような、挑戦的言動を織りまぜながら語った。特に、症例が述べる生活上の難しさは、アルバイトの職場の出来事も然ることながら、多くは父親とのやり取りにあった。邪魔扱いされている、家庭における責任を果たさないと謂れない非難を浴びせる、患者自身の立場に立って考えてくれず、現状批判を行う、など、父親との間でいたたまれず、窮してしまうような気持ちを味わうことを語った。そして、患者にとって「てんかん」障害が、将来への希望の全てを阻んでいるのだと、病気に関わる悩みを語るようになったのは、出合ってほぼ1年経過した後になってからであった。

以後、患者は、何度か発作のために入院があったが、福祉施設に通所しながら、障害受容を行い、福祉制度を活用するようになり、定職にはついていないが、経済的に一応安定を得て、自活の道を目指すようになった。

4.1.6 事例1に現れた対人関係パターン 患者の陰性感情は、初めての精神神経科入院時に、患者が心理臨床者の来室があると思っていたのが、裏切られたことに始まる。心理臨床者にしてみると、約束をしていたわけでもなく、また、来室はしたが、そのとき患者が見あたらなかった、という事情によるものであった。しかし、これを契機に、心理臨床者と患者の間で作られた対人関係のパターンを図示すると、図1のようになると思われる。

患者は、心理臨床者を「手を抜いて」「全力を出さず」それによって「人を馬鹿にしている」存在であることを告発しようと、集団場面において容赦なく行動化した。加えて、ミスをあげつらい、馬鹿にしたような態度を示した。心理臨床者は、患者がこのような振る舞うのはなぜかを問うことに職能の基本があるので、反論するとか、周囲に理解を求める、などの自己防衛的措置をとることは、予め断たれている。そのため、周囲との関わりにおいても、いたたまれなさを味わうこともあった。しかも、心理臨床者にとっては、患者は何を求め、何のための面接かわからないまま、一対一の面接場面も継続して持ち、患者自身も継続を求めるのであった。そのうちに、心理臨床者は、一時期、心因性と思われる腹部症

状に見舞われた。

しかし、退院後、わかってきたのは、「てんかん」発作や、「てんかん」に起因する社会的活動の制約から、世間や家族、特に父親との間で、いたたまれない思いを嫌というほど味わっていたのは、患者本人だったということである。そして、患者は、こうした心情と共に腹痛や頭痛などの心身症的症状に苛まれていたのである。

そうすると、心理臨床者が患者との間で経験した心情は、そのままではないにしろ、患者と同型の体験構造からなる心情であったように見えてくるのである。

患者は、父親や世間との間でいたたまれない心情を被る立場であったのが、心理臨床者に、いたたまれなさを被らせる立場となったのである。そして、これは患者が受動的立場から能動的立場になった、という患者側にとっての積極面だけでなく、心理臨床者にとっては、そのような不当な攻撃を加えざるを得ない患者の背景に関心をもって関わる姿勢の維持、という点で、重要な経験となったのである。つまり、共感というものが、他人事ではなく自らのこととして分かるということであるとするなら、そうした共感の核の形成という点で、患者によって味わうことになったいたたまれなさが貢献したのであった。

また関係構造からすると、構造的には、心理臨床者は、もう一人の患者と同じ様な状況にある個人として位置付けられる。このような構造位置に心理臨床者を置くことの患者にとっての意味を考えると、単に代替対象に対する復讐と考えるべきであろうか。患者は、その後、何年かの長い経過の中で、障害を患者なりに受容し、現実的な福祉制度の利用という方向で、経済的安定を図り、さらにそれを基礎として、自立を目指して動きはじめた。心理臨床者との関わりが全てを作ったわけではないが、定職に就くという方向から発想の転換に至る経過の中で、心理臨床者との間で、このような関係様式を作ったことに何らかの、当時の現状が患者に要請した、再適応の模索の形態が反映されているに違いない。これに関しては次の章でさらに考察対象とする。

4.2 事例2

事例2は、整形外科的疾患のため、休職するようになってから、患者本人の希望により、心理面接を開始することになった、女性患者とのやり取りからなる。

4.2.1 家族構成など 祖母、母、本人、妹の4人家族。本人は独身で、家族は全て女性である。

4.2.2 家族歴 祖母は頑健で働きもの。近隣の小学校の小使をしていたことがある。退職後も家の回りの仕事を何かと行っていた。母は喘息のため病弱である。祖母も離婚経験があるが、母は2度離婚経験があり、患者と妹は母の一度目の夫との間に出来た子供であるが、実父を患者は知らない。生計は祖母や母が担っていたが、経済力不足のため生活保護を受給していた期間が長い。

4.2.3 既往歴 特筆すべきものはない。

4.2.4 若干の生育歴 実父は酒乱で、患者本人やそ

の妹を出産後に離婚。次の夫である義父も家に寄りつかず、母親も病弱なために、幼少期から経済的にも家庭的にも患者は恵まれなかった。その義父から患者は性的悪戯を受けたが、患者は、普通の家庭生活に憧れ、自分さえ我慢すれば家庭の安寧が保たれると信じ、性的悪戯の事実を誰にも語らず、学業に勤しみ優秀な成績を修めていた。しかし、長じて、義父が性器挿入を試みようとするに及んで、助けを求め、母親や親戚に性虐待の事実が知られることとなり、それまで潜在していた夫婦の不仲は決定的となり、母親は義父との離婚を決意した。しかし、母は患者を慰めることはなかったと言う。

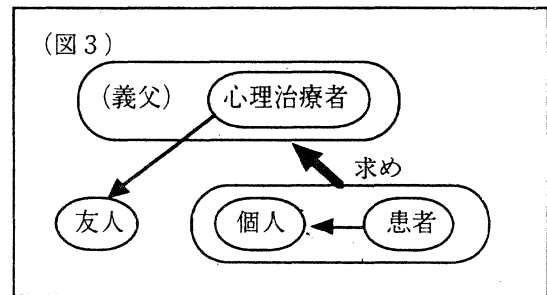
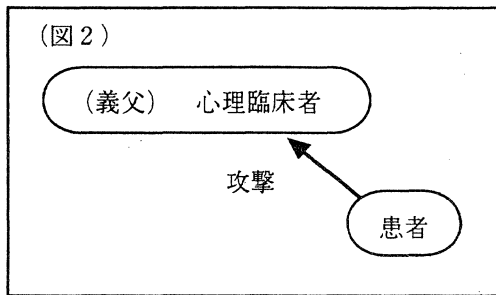
以来、患者は、一家の大黒柱となるべく精進して専門職に就き、若くして生計の担い手となった。結婚を考えたこともあったが、家族の意向に条件が合わず断念したこともあった。

4.2.5 現病歴 家計を担い一家の大黒柱となって、家までも新築をするが、間もなく整形外科的疾患を患う。術後の経過思わしくなく、休職期間が長くなったが復職を図る。しかし、復職後、将来への不安と、生育歴について疑念を抱くようになり、心理相談室を自ら訪れた。心理面接開始後まもなく、不眠、自殺企図により頻回に精神神経科に入退院を繰り返すことになった。

4.2.6 事例の提示 様々な状況因子との関わりの中で、自殺衝動に襲われながら、患者も自らを建て直そうと努力をするのだが、頻繁に自殺未遂を繰り返し、それと共に入退院も頻回となったため、何年かの内に、職場は退職、生計の担い手であった患者は経済破綻に陥ることとなった。心理臨床者も、その都度、適切な対応や処遇を求め、他の医療者と共に検討し、最善と思われる関わりを模索するが、一向に功を奏さず、患者が、これまで築き上げたものを失っていくのを見ているより他はなかった。

患者は、家族の犠牲となっていたことを意識し始め、自らを家族の犠牲者と位置付けることに、母親はじめ同胞も辟易し、疲れ、患者は献身への感謝も得られず、そればかりか疎まれるようにさえなっていた。最後には家財や愛着対象などの全てを手放し、或いは処分せざるを得なくなり、患者は悲嘆に暮れ、失意を深め、時に心理臨床者に恨みごとを述べた。それでも決意し、そこから、一から出直し、自分のために生きようという気持ちが患者に徐々に沸き起こり、何度目かの退院を考えるようになった頃には、心理臨床者が患者と出合って3年が経とうとしていた。

退院を考えるようになっていたある日、心理臨床者が患者の居室を訪れると、患者は、髪を染めていた。気分転換をしようと思って、と晴れやかな表情であった。心理臨床者は感心したことを表明するうち、患者から、幼児に欲情することがあるか、との質問を受けた。質問の真意を聞くうちに、患者は、患者自らの性虐待が、患者自身の何かが養父に劣情を催させたために起きたのではないか、との疑念が去来してやまぬことを述べるの



だった。心理臨床者は言下に否定し、子供に責任があるはずはないことを主張し、疑念を払拭することに努めた。

次に、いつものように居室を訪れると、患者は、心理臨床者によって貶められた、と主張した。心理臨床者は、困惑しながら、何がそのように思わせたのか尋ねると、髪を染めたので、人目を引くと言われたことで、貶められ、傷つけられた、と憤りを隠さず訴えるのであった。それに対して、心理臨床者が、そういう主旨での話しではなかった、と説明しようとすればするほど、本人の攻撃心を正当化する材料になっていき、如何に心理臨床者が、患者を傷つけないが憚ることのない、厚顔無知な人間であるかの証明を見るかのように、患者は受け取るばかりとなった。心理臨床者は、本来、攻撃したいのは誰か、と感情と出来事のつながりへの洞察を求めたが、言いたいことは分かるが、それはすり替えだと断じた。そして、これまで話を色々してきたが、それでも、このように分かりあえない、と一方的に言い放った。その後も、心理臨床者と、面接することを拒否し、話しをする機会も得られぬまま、数日が経過した。すると、患者自ら訪れてきて、心理治療者としては信用ならないが、一人の友人としてなら、助けてほしいという申し出があった。

心理臨床者が、どのような立場に立って援助を行おうとしているのか、という、この患者のこだわりに苦慮しつつも、面接を継続的に重ねた。同時に患者は徐々に経済的目処を立て、一人暮らしをする算段を図り、退院となった。

この退院以後、患者の問題行動であった自殺未遂行動は、数年を経て猶、治まっている。

4.2.7 事例2に現れた対人関係パターン 攻撃性は、陰性感情の一つである。ここで、心理臨床者は、患者にとって、患者の女性性を貶めるものとなり、患者にとって攻撃性を発揮するに当然の対象となった。しかし、それまでの経過と関わることであるが、患者にとって攻撃すべき、許し難い対象として心理臨床者は位置付けられるが、「治療者」としてではなく、「友人」として心理臨床者に援助を求めるようになる。

心理臨床者にとっては、本来、このような攻撃を向けるべき対象は、面接の流れからも、患者の義父に対してであろうと、容易に推察出来るものであった。つまり、

攻撃（怒り）は、それ自体、正当な感情であるが、攻撃を向けるべき義父像が心理臨床者に重ねられ、心理臨床者は、患者から付与された、義父に関連するイメージを払拭しようと働きかけた。しかし、これは功を奏さず、患者にとって心理臨床者は、ますます欺満の対象であり、怒りの対象となっていくばかりであった。

図示するとそれは図2のようになるであろう。

ところが、次に患者は、心理臨床者に「治療者」としてではなく、患者の個人的な「友人」としての援助を求めるようになった。これを図示すると図3のようになるであろう。

患者の心理臨床者を「友人」と設定しようとする求めは、自ら、義父イメージから、心理臨床者を、掬い取ろうとしたように見えるのである。そのことは、患者自らを、患者的側面から、より幅のある個人として、関係性の中で、移行させることになる、とも言える。そして、「治療者」-「患者」という差異のある関係から、「友人」という患者にとって水平線上のつながりを求めることは、本来、義父の性虐待の事実の暴露の時、患者が求めたが、得られなかった母の関係位置なのではないだろうか。

その後の経過に本論文はほとんど触れていないが、心理臨床者は、患者の求める「友人」を、求めとして尊重しても、そのまま体现することはなかった。しかし、患者は、自ら患者であることをやめる、別の意味で苦難の道を選択していったのである。

5. 考察

ここで考察すべきことは二点である。第一点は、ここで提示した事例が一般的に転移といわれている現象の特徴をどれほど示しているのか、ということと、心理臨床者のそこでの態度についての検討である。そして第二点は、心理治療を、再適応のために、対人関係を通じて行われる再学習の場である、としたが、事例が示した対人関係パターンが、再学習にとって、どのような意味と役割を担ったことになるのか、ということについての検討である。この検討は、一見、不適応な対人関係パターンが、心理治療の場でも繰り返されただけのように見えるが、再学習にとって必要なプロセスなのかもしれないという提言も含む。

5.1 事例に現れている転移としての特徴

事例1は、「てんかん」のために、幼少期から患者が被ってきた体験様式が、心理臨床者と患者との間に作られた対人構造の中で、患者の能動的立場を実現する、という形で再現されている、とも言えるかもしれない。しかし、幼少期に起源をもつというよりも、むしろ、ここで作り上げられた対人関係パターンは、現在も患者に深刻となっている現状において患者が味わっている心情が、心理臨床者に実現することを可能にしたようにみえる。

そして患者が、患者自身が置かれている状況に心理臨床者を置こう、という自覚を持っていたとは、確かにこの場合は考えにくい。この事例の場合、代替物に対する復讐衝動に似た心情に駆り立てられている面が強いが、もちろん何らかの代替物と感じているわけではないだろう。

ここで特に強調すべき特徴として挙げられるのは、攻撃対象である心理臨床者に、その最中であって、個人面接という形で頼ってもらっている、ということである。これも被っているところの体験の再現とみるならば、攻撃しつつも頼りにもする（患者の立場からすると、攻撃されつつも頼りにもされる）、という関係様式の中に、患者自身が置かれていることの表現なのかもしれない。しかし、こうした対人関係パターンが顕在化する、前後の経過を見るならば、心理臨床者と患者が、一種の援助関係にあることについての了解は成立していた、と見てよいだろう。すると、攻撃しつつも頼りにする、ということに関わった反復行動なのか、それとも、援助関係はすでに成立しているのです、その中で、攻撃性に関わる状況が反復行動となって再現された、と見るべきかは微妙なものとなる。

心理臨床者の立場からすると、中立的な立場であろうとすることに多大なる労力を強いられたことになる。しかし、この中立的であろうとする態度によって、患者の生活時間にとっては僅かな時間でしかないが、その後も、継続して、患者と関わるのが可能になった、と言える。患者が、一応の今後の見通しを立てるところまで付き合えた、少なくとも長い経過の中で、このときとは異なった関係構造を患者と作り上げて行くことになったことに、心理臨床者として、この中立的な態度の意味を見い出せるであろう。

事例2は、過去の性虐待という外傷体験が、心理臨床者と患者との間に作り上げられた対人構造に、深く関与していると思われる。この事例の場合、心理臨床者は、本来攻撃したいのは誰か、と質問を投げかけるが、このとき患者は、言いたいことは分かるけれどもそれはすり替えだ、と述べている。それゆえ、陰性感情と義父とのつながりに無自覚であったわけではなく、言わばこの認識に抵抗していると言える。

また、この事例2の場合は、対人構造の中での位置を代えることで受動的立場から能動的立場になったのでは

なく、患者自身が、性的に搾取する義父的存在に対して能動的に振る舞うようになったのだと言える。患者が、当時は表現できなかったであろう感情を、異なった対象に行動化した、という点では、反復行動的であり、不適応行動であるかもしれない。しかし、代替対象ではあっても（もちろん患者は代替対象とは思っていないが）、患者が、当時表現できなかったであろう感情を行動化した、という点で、新たな可能性を生きた、とも言えるのである。このように考えると、過去の人物との間で経験された感情を反復する、と言っても、それが反復強迫的に不適応行動の繰り返しとなる場合もあるが、異なった対象との間であっても、新たな個人の可能性を、行動として生きようになるための再適応への試み、ということもあるように思えてくるのである。それには、やはり、原体験とのつながりが、そこで表現された感情との間で意識されていることは必要である。そうでなければ、患者自身、それ程の怒りがなぜ沸き起こるのかが分からなくなる。しかし、感情を向ける相手が、少なくとも患者にとって、代替対象であってはならない。なぜなら、患者が表現した感情が偽物になってしまうからである。

心理臨床者にとっては、これも中立的であるには難しい立場となる。この場合、患者を性的に搾取した義父の属性を自らに引き受け、しかも患者にとっての援助者として生き残らねばならないからである。性的に搾取した人物が、患者にとっての援助者となることは出来るだろうか。

この事例の場合、患者が「治療者」ではなく、「友人」として援助してほしいと求めたことで、これが可能になったと言える。心理臨床者から、性的に搾取する、という属性だけでなく、「友人」としての属性を引き出そうとすることで、患者は援助者を自らに作り上げたのである。そして、このような患者の働きを可能にしたのは、心理臨床者が、患者の投げかけた義父的イメージを払拭することばかりに専心せず、中立的であろうと心がける姿勢を持ったことが要因の一つになっていると思われる。もしも、この患者の心理臨床者に対する、性的に搾取する存在としての扱いを不当なものとして、或いは、心理臨床者は代替対象であると認めない態度を抵抗だとしたならば、この心理臨床者から「友人」としての属性を患者が引き出せたかは、大いに疑問である。

ここで示した事例は、転移は過去の重要な人物との間で経験された感情や体験を、無自覚的に反復する、という特徴が、確かに反映されている。しかし、それは単純に転移は不適応な対人関係を再現するものというのではなく、患者のそのときの状況と課題に対応して、発動されているように見えるものであった。

5.2 再学習事態からみた事例の関係構造

ベイトソンの学習理論に従えば、転移とは学習Ⅱと呼ぶべき、習得された個々の経験や出来事を括り取る括り方、一種の構え、物事を捉える見方、を心理療法の場

にも持ち込むことであった。それゆえ、論理階型学習理論の立場からすると、心理療法或いは心理治療の場は、現在の対人関係において不適応を作り上げる、その個性的な構えや見方を修正する場となること、習得された構えの再学習の場となることが求められる。

事例1にも事例2にも現れていると考えられる共通の特徴は、対人構造における、心理臨床者の患者にとっての位置付けの特異さにあると思われる。つまり、事例1においては心理臨床者は、患者にとって援助者ではあるが、患者を馬鹿にする存在であり、いたたまれなさを味わわせるべき存在であるようだ。事例2でも、心理臨床者は、患者を援助する存在ではあるが、性的に搾取する義父的存在と看做されている。

どうしてこのような位置付けを患者が行うのか、という疑問に対して、それは、そういう看做し方をする対人関係での見方のパターンを学習してきたから、というのが一つの解答であろう。しかし、心理臨床者は患者にとって援助をなすべき存在でもある。この認識も両事例における患者は持っていたと思われる。そうすると、事例で示されたような状況の時に、患者が課せられていた本来の課題とは、患者を馬鹿にしたり、性的に搾取したりする人物はまた援助者でもある、そういう人とどのような対人関係をもつか、ということであったと考えられる。これは逆かもしれない。援助者でもあるが、不快な体験を引き起こす人物でもある、そういう人とどのように付き合うか、ということが課題だった、とも言える。

転移とは、物事の見方に関わる学習Ⅱと呼ぶ種類の学習の現れ方だ、ということ述べた。物事の見方の再学習とは、別の見方を学ぶこと、と言って良いだろう。しかし、物事の見方とは、ベイトソンも言うように、正しいとか間違っているとか言える代物ではないのである。そういう見方もああいいう見方も成立するのであるから、見方の変更の必要性は真偽判断からは生まれない。

こう考えると、なぜ患者がこのような位置付けを心理臨床者に行うのか、という疑問は、対人関係における再学習の場としての心理治療にとって、切実な問いへと移行せざるを得ない。それは、患者が行った、このような心理臨床者に対する位置付けが、物事の見方の再学習にとって如何なる寄与をなしたと言えるのか、ということである。

この答えは、患者が課せられていた課題にある。心理臨床者と患者との間で作られた対人関係から、患者は心理臨床者を、「馬鹿にする存在」「性的に搾取する存在」として括り取る。しかし、そこで作られた対人関係は、その患者の括りとり方に落ち着くことを許さない対人パターンも含んでいる。それゆえ、患者は、心理臨床者との関係を維持しようとするとき、異なった括りとり方がすでに要請されていることになるのである。このとき、「性的に搾取する人物」を「友人」に仕立て上げることで、この心理臨床者との援助関係を維持しようとするかもしれない。しかし「友人」でもない、という風

に、患者自らが括りとりやすい見方をとろうとすることに留まらせない構造が、心理臨床者との間で生じる転移状況における患者の課題には、すで込められているのである。つまり、患者が慣れた対人関係における見方を採用しようとする、そこに治まらない関係が構造の中に現れ、別の見方を自らが習得せざるを得なくなる、ここに転移状況の再学習の場としての可能性があると思うのである。これには心理臨床者の、そこに於ける態度が重要な役割を演じている。

しかし、心理臨床者にとっても、心理療法の場を、患者の見方に関わる再学習の場とすることは困難なことと言わざるを得ない。それは、心理臨床者も、個性的に物事を括り取るような見方を身につけた存在であり、そういう点では、患者と同等の立場にあるからである。そして、先にも指摘したように、患者が心理臨床者にとる見方が不当だと思われる時に、それを証明出来るわけでもない。また、患者の見方が正当と思われることもあるだろう。心理臨床者は、患者の行う対人関係における物事の見方、心理臨床者に対して行う捉え方に何らかのズレを検出すること、そしてそのズレを生きること、が求められる。そこに落ち着いていて良いのであれば、再学習の必要は生まれなくなる。こういう言い方が可能ならば、次のように言うことも出来る。

患者の見方と、心理臨床者と患者の間に繰り広げられる対人関係を構造づけているものとの間に、ズレ或いは差異があること、それが心理治療の場を、ものの見方の再学習の場とするのだ。差異こそが、学習を動機づける。

そして、ここでの学習は、長期に亙る体験学習的なものであり、これこれこうですよ、と説明されて成立するようなものではないと思われる。また、心理臨床者が差異を否定し、対人構造の中のどこかに自ら落ち着こうとするならば、学習の動機づけは低減することになる。

6. おわりに

本論文は、事例に現れた陰性転移における、対人構造の検討から進めてきたものである。転移という現象に論を広げるためには、陰性転移ばかりでなく、陽性転移についても検討対象とすべきだったかもしれない。しかし、転移とは、心理療法の場に、対象者が学習Ⅱと呼ぶべき習得された物事の見方や構えを持ち込むこと、という定義に従うならば、そうした構えを持ち込んでいる状況を取り上げていけば、一応、検討素材になると考えた。また、事例で示した陰性転移が、患者が置かれた状況や課題と対応して発動されているように見える、と述べ、さらに、心理療法の経過中に現れる陰性転移は、再学習の場であると述べた。事例の提示の中で、若干、各々の事例が置かれていた状況について触れ、その後の転帰についても述べた。しかし、再学習の場である、と言うならば、ここで取り上げた陰性転移状況から推察される、

これまでの患者の一種の構えの在り方, そして心理臨床者との間で作り上げられた対人構造の中で学習した内容, それとその後の転帰との関わりについてまで検討しなければならない。そういう点で徹底さに欠いている。

そして, 本論文では, 陰性転移と言えるような状況を事例として取り上げ, 事例が作り上げたと考えられる対人構造の検討を試みた。この時, ベイトソンの論理階型学習理論に従って, 転移状況は, そのまま学習Ⅱのレベルでの再学習の場にも成りえるということを前提に検討した。本来は, 当のベイトソンの学習理論が前提としてある事実, そして転移という力動精神医学の概念が前提としている事実の検討から始めることが課題となるであろう。そういう意味で, 本論文はさらなる本来の課題に向けての布石というべきものであると言える。

謝辞: まず名を挙げることの出来ない, 患者として対象者になってくれたお二人に感謝します。そして心理臨床者としての未熟さを, 時と時間を問わずいつも支える, と名言, 実行してくださった, 北海道大学名誉教授, 札幌学院大学学長の狩野 陽先生, そして休日や夜更けにも関わらずいつも快く迎えてくださった先生の奥様である狩野和子様とそのご子息様達にも, 心より感謝いたします。先生の変わらぬ支えの姿勢なくして, 長期にわたって, 少なくとも心理臨床者であろうと努めつづけることは出来なかった。最後にこの論文を着手するきっかけを与えて下さり, 貴重な御意見を下さった室蘭認知科学研究会の諸先生方に感謝し, 稿を終えさせていただきます。

文献

- (1) アンリ・エレンベルガー, 無意識の発見 (下), 弘文社, (1991), p76-77.
- (2) 遠藤 幸彦, 転移の取り扱いとはなぜ重視されるのか, 精神科治療学, 13巻, 1号, (1998) p118-120.
- (3) ジクムント・フロイト, 転移の力動性について, フロイト著作集9, 人文書院, (1987), p69-77.
- (4) ジクムント・フロイト, 快感原則の彼岸, フロイト著作集6, 人文書院, (1989), p150-194.
- (5) ジクムント・フロイト, 想起, 反復, 徹底操作, フロイト著作集6, 人文書院, (1989), p49-58.
- (6) 岸田 秀, フロイドを読む-5, 反復強迫と転移, イマーゴ, 青土社, Vol.1-5, (1990), p222-231.
- (7) グレゴリー・ベイトソン, 精神と自然, 思索社, (1982).
- (8) グレゴリー・ベイトソン, 精神の生態学 (上), 思索社, (1986).

(9) グレゴリー・ベイトソン, 精神の生態学 (下), 思索社, (1987).

(10) グレゴリー・ベイトソン, 精神のコミュニケーション, 新思索社, (1995).

「エルサレム」における「教会の覚醒」

安藤 栄子

On "Reawakening of the true church" in Jerusalem

Eiko ANDO*

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

In my recent thesis I elucidated the complicated and chaotic structure of *Jerusalem* by interpreting chapter 1. In this thesis I would like to explicate what Blake wants to say in chapter 2. In chapter 2 Blake defines "the Religion of Jesus" as "true Christianity" whose essence is 'Forgiving of Sins', on the other hand Judaism which insists on punishment for sin and emphasizes 'the ten commandments' is regarded as 'false religion' or 'dogmatic christianity' by Blake. According to Blake, England was the holy land ruled by Jesus but the Anglican Church in the 18th century was corrupt and adhered to false religion like Judaism. Therefore Blake first points out the decline and fall of the Anglican Church and then encourages it to remember the omnipresence of Jesus who always forgives sinners without judging or punishing them. Blake seems to describe in chapter 2 the restoration of the Anglican Church through the image of decline and fall, struggle and rebirth of Cathedral Cities like London, Bath and Ely.

Key words : Religion of Jesus, Jerusalem, Cathedral Cities

1. はじめに

先に *Jerusalem* (1804-1820) を論じた際にこの作品が多くの読者を当惑させている事実を指摘し、その理由を第1章を中心に分析することで明確にした¹⁾。この小論では第2章を取りあげるが、それはBlakeがこの作品を書くに到った動機の一つが第2章の「序」"To the Jews" に述べられてあると思われるからである。すなわち想像力の世界に覚醒したBlakeの目にはかって

ロンドンにはエルサレム神殿が建てられ、英国はイエスに支配される「神の国」であったが(プレート27, 11.1-24)、今では神殿は破壊され英国は悪魔に支配されていると映ったのである(同プレート、11.29-48)。Blakeの悲しみと怒りは彼を奮起させ、英国を再建させるために*Jerusalem*を執筆したのだと思われる。それでは彼はその思いをどのように描いたのであろうか。第2章を中心に論じてみたい。

2.

まず第2章の「序」"To the Jews" (pl.27)の冒頭8行

* 共通講座

を以下に引用しよう。

Jerusalem the Emanation of the Giant Albion!
 Can it be? Is it a
 Truth that the Learned have explored? Was
 Britain the Primitive
 Seat of the Patriarchal Religion? If it is
 true, my title-page is also
 True, that Jerusalem was & is the Emanation of
 the Giant Albion. It
 is True and cannot be controverted. Ye are
 united, O ye Inhabitants
 of Earth in One Religion, The Religion of
 Jesus, the most Ancient,
 the Eternal & the Everlasting Gospel. The
 Wicked will turn it to
 Wickedness, the Righteous to Righteousness.

"Jerusalem the Emanation of the Giant Albion! Can it be?"と問い Blake は英国 (Albion) とエルサレムとの関係の深さを指摘する。この一見すると Blake の独断とも思われる英国とエルサレムとの密着性を証明するために Blake はまず "Is it a Truth that the Learned have explored?" と問い、'the Learned' に示される 17, 18 世紀当時の考古学者達に言及する。なぜなら彼らは「古代のすべての宗教は互いに関連しあっていた」とか「ドルイド僧と族長とは密接な関係にあった」と述べたからである²⁾。そこから "Was Britain the Primitive Seat of the Patriarchal Religion?" と言われるように英国は古代イスラエルにおけるモーゼ以前の族長の宗教つまりユダヤ教の中心地であったことが類推されるのである。

そして "If it is true, my title-page is also True, that Jerusalem was & is the Emanation of the Giant Albion." の一行はエルサレムが単に過去のみならず現在も英国の "emanation" つまり「流出」であることを示す。エルサレムが英国の「流出」であることはエルサレムが英国の本質もしくは生命体であることを意味していると思われる³⁾。これはどのようなことを意味しているのだろうか。これを解く鍵は次の "Ye are united, O ye Inhabitants of Earth, in One Religion, The Religion of Jesus, the most Ancient, the Eternal & the Everlasting Gospel."にあると思われる。Blake は「この世の人々はイエスの宗教においてひとつに結ばれるのであり、それは最も古い宗教であり、永遠の福音である」と述べる。ここで「イエスの宗教」がいわゆる歴史上のキリスト教を意

味しないことはそれが「最古の宗教」と言われることから推測されよう。キリスト教はユダヤ教を母胎に誕生した宗教であり、ユダヤ教以前には存在しなかったはずである。それでは「イエスの宗教」とはなんだろうか。それはドルイド教 (英国の古代の宗教)、ユダヤ教、そしてキリスト教をも超越したいわばすべての宗教の母胎、根源であると思われる。そして "The Wicked will turn it to Wickedness, the Righteous to Righteousness." (11.7-8) と言われるように「イエスの宗教」を歪めそこから分裂することで「邪悪な宗教」と「義なる宗教」が誕生したのである。前者はドルイド教を後者はユダヤ教を指すと思われる。なぜならドルイド教においては罪を犯したものは罰として生け贄となることを要求されるからであり⁴⁾、一方ユダヤ教においてはヤハウェを唯一絶対の神と信じ [十戒] を厳守し義人となることを目標とするからである。このように罪にたいして罰を求め、そして律法を強要する宗教に対し Blake の「イエスの宗教」は彼自身の作品である「永遠の福音」(1818)にあきらかのように「罪の許し」を主眼とする。「イエスの宗教」のイエスこそは Blake の唯一の神であり、それは多なる宇宙万物を一に融合させる強力なエネルギーであり、愛と慈悲の本体であろう⁵⁾。エルサレムは現実のイスラエルの首都というよりは「イエスの宗教」が行われる国すべてに存在する永遠不滅の聖都と言えよう。エルサレムが英国の生命体であるということは英国で「イエスの宗教」が広く流布しているということであり、英国が「神の国」でありうることを示唆していると思われる。

ところですべての宗教がめざすべき "The Religion of Jesus" を「真のキリスト教」、「完全なる宗教」と呼ぶならば、罪ゆえの罰を求める宗教は「不完全な宗教」であり、多くのドグマを持つ「独断的キリスト教」と呼ばなければならぬ。Blake は「独断的キリスト教」を「27の天、あるいは教会」(Milton, 32:25) と呼び、いずれも対立を含む不安定な性質であると述べる⁶⁾。それでは18世紀の英国のキリスト教を Blake はどのようにみていたのだろうか。既に言及したように Blake は英国はかつて「イエスの宗教」が隅々まで行き渡った「神の国」であったと実感しすべての人々が無心に生きる様子を次のように描いている。(pl.27, 11.1-24).

The fields from Islington to Marybone,
 To Primrose Hill and Saint John's Wood,
 Were builded over with pillars of gold,
 And there Jerusalem's pillars stood.
 Her little ones ran on the fields,

The Lamb of God among them seen,
And fair Jerusalem his Bride,
Among the little meadows green.

.....

She walks upon our meadows green,
The Lamb of God walks by her side,
And every English Child is seen
Children of Jesus & his Bride.

Forgiving trespasses and sins
Lest Babylon with cruel Og
With Moral & Self-righteous Law
Should Crucify in Satan's Synagogue!

英国が「神の国」であったということは具体的には
カンタベリー、ロンドン、ヨーク、エジンバラという
4つの重要な大聖堂都市とその他の24の大聖堂都市
ではすべての聖職者達が「罪の許し」を実践し、貧民
のため心を尽くしたと Blake は言っているように思わ
れる。ところが

Albion's Spectre from his Loins
Tore forth in all the pomp of War:
Satan his name: in flames of fire
He stretch'd his Druid Pillars far. (11.36-39)

と言われるように Albion (英国) に理性 ('Spectre') の
力が急速に発達することで「イエスの宗教」は "Druid
Pillars" に象徴される「ドルイド教」のような「不完全
な宗教」に変貌し、それが今18世紀の英国を席卷す
るのである。このことについては後に再び言及する。
Blake は「不完全な宗教」に陥った英国を一方向的に非
難するのではない。Blake 自身も「不完全な宗教」に
陥ったことがあることを認め次のように告白する
(11.65-80)。

And O thou Lamb of God, whom I
Slew in my dark self-righteous pride,
Art thou return'd to Albion's Land?
And is Jerusalem thy Bride?

Come to my arms & never more
Depart, but dwell for ever here:
Create my Spirit to thy Love:

Subdue my Spectre to thy Fear.

Spectre of Albion! warlike Fiend!
In clouds of blood & ruin roll'd,
I here reclaim thee as my own,
My Self-hood! Satan! armed in gold.

Is this thy soft Family-Love,
Thy cruel Patriarchal pride,
Planting thy Family alone,
Destroying all the World beside?

イエスを殺すのは常に "dark self-righteous pride" と言わ
れる「自我」である、自己中心的な心である。Blake
は自分が犯した過ちを深く悔いて再びイエスのもとに
帰ろうとするのである。Blake はさらに「暗い独善的
誇り」をユダヤ教徒の「残酷な族長的な誇り」と同一
視する(1.78)。ユダヤ教徒は「十戒」を遵守しヤハウエ
の前に義人であることに民族的誇りを覚え、異教徒を
殺戮するのであるが、「不完全な宗教」を克服した Blake
は彼らの残忍な行為に対し「ワトソンの「聖書の弁護」
にたいする書き込み」の中で激しく抗議する⁷⁾。ユダ
ヤ教徒の誇りは Blake には真実の神、イエスへのこの
うえない冒涇とうつつたのである。正義を愛し道徳を
重視するだけでは本当の宗教に到ることは困難であ
り、18世紀の英国国教会が体現するキリスト教はユ
ダヤ教同様「不完全な宗教」に留まると Blake には思
われた。第2章の主眼はこの「序」でほぼ述べられた
と思われるが、さらに本文を分析していくことにしよ
う。

3.

本文冒頭には "punisher", "judge" つまり「処罰者」
「審判者」としての Albion が登場する。彼の足元か
らは "Moral Virtue", "the Law Of God" すなわち「道徳的
美徳」、「神の掟」と同一視される一本の「死の木」("A
deadly tree") が現れる (pl.28, l.15)。「死の木」は「神秘の
木」とも呼ばれ、「知恵の木」を意味すると思われる⁸⁾。
つまりそれは理性の働きを意味するのであり、理
性は想像力と分離すると「掟と道徳を組立て神の肉体
である想像力を破壊する」のである (pl.74, ll.10-14)。
Albion は理性的となり道徳、掟を重んじるが、その結
果次のような行動にでる。

From willing sacrifice of Self, to sacrifice of
(miscalled) Enemies
For Atonement. Albion began to erect twelve
Altars
Of rough unhewn rocks, before the Potter's
Furnace.
(pl.28,11.20-22)

上の引用文中「進んでする自己の犠牲」とは自分自身を相手のために犠牲とすることで、「完全な宗教」である「イエスの宗教」が説く「自我滅却」を意味すると思われる。しかし Albion は自分を否定することを止め、その代わりに「敵」を犠牲にしようとするのである。敵と味方とを区分し、味方のために敵を抹殺するのも理性の残酷な働きと言えよう。「twelve Altars」「12の祭壇」はイスラエルの12支族を想起せしめよう。彼らはヤハウェのために異教徒を殺戮することを美德とする義なる民である。Albion も味方のために敵を犠牲にしようとしており、理性の持つ冷酷さがユダヤ民族と Albion を通して浮き彫りにされる。さらに Albion は自分の分身である息子達を「最初の違反者」とよび、「生け贄」にしようとするが、彼らは「身代金を求めて山に逃亡した。」(pl.28,1.25)「不完全な宗教」と呼ばれているユダヤ教の族長時代にもイサクは父アブラハムに従い生け贄になることを潔しとしたが⁹⁾、理性化が広がり自我が支配的な18世紀の英国では息子は父に逆らい自分以外のものを身代わりにしようとするのである。このように Albion の理性化が深刻化すると

"Battersea & Chelsea mourn, London &
Canterbury tremble"
(pl.33 (29)1.12)

ということになるのである。Blake は"for Cities Are Men, fathers of Multitudes" (pl.38 (34)11.46-47)と述べ、「都市」と人間とは父と子のように愛しあい、庇いあうと考える。つまり父である都市が悲しみ、震えるのは明らかに異様な事態である。とくに上のロンドンとカンタベリーは主要な大聖堂都市であり、それらが震えるのは大聖堂都市に象徴される英国国教会の不安定を示すものと思われる。国教会は17世紀の清教徒革命とその後続いた宗教論争により疲弊したのであり、18世紀になると宗教的情熱はすっかり冷めてしまっ

たといっても過言ではあるまい。主教の多くは政党と組んで積極的に政治に参加するようになり、当然のことながら主教区の福祉等には関心を示さず、さらに富裕な主教位への昇格をあからさまに望むようになったのである¹⁰⁾。Blake は国家とこれに媚びを売る教会を激しく攻撃するが、*Songs of Experience* の"The Garden of Love"では教会から愛が失われ、掟と律法で無垢なる魂をしぼり苦しめる聖職者の冷淡さが以下のように歌われる。

And the gates of this Chapel were shut,
And "Thou shalt not" writ over the door;
So I turn'd to the Garden of Love
That so many sweet flowers bone;
(第2連)

And I saw it was filled with graves,
And tomb-stones where flowers should be;
And Priests in black gowns were walking their rounds,
And binding with briars my joys & desires.
(第3連)

このように国教会内部は腐敗しており、その上国教会は理神論からの攻撃を受けねばならず、18世紀の国教会は内憂外患の状態に直面し、四苦八苦の有様であったと言えよう。大聖堂都市ロンドンとカンタベリーとはこの不安のために震えていたのである。

4.

それでは霊的な危機に直面する国教会にそして Albion に救いはあるのだろうか。確かにイエスは迷える子羊 Albion のあとからついてきており、救いの手を差し伸べるのである。

And the Divine voice came from the Furnaces,
as multitudes without
Number, the voices of the innumerable
multitudes of Eternity!
And the appearance of a Man was seen in the
Furnaces
Saving those who have sinned from the
punishment of the Law
(In pity of the punisher whose state is

eternal death)
And keeping them from Sin by the mild
counsels of his love.
(pl.35 (31) ll.3-8)

ここに罪ゆえの罰を主張する「独善的キリスト教」に陥っている Albion と国教会の「真のキリスト教」への転換の鍵が示されてある。それは自己に目を向けず敵を心から許すことである。「罪の許し」を実行することである。それは理性的であってもできないし、理性を否定しようとすることによって実現しない。想像力の世界に目覚めて愛に生きるという別な情熱を持つことによってのみそのジレンマを抜け出せるのである。この時我々は二元の世界を出てイエスとともにあり、すべての人々と調和ある世界に生きるのである。そして次の引用に見られるように「真のキリスト教」「イエスの宗教」を具体的に体験するのである。

"Mutual in one another's love and wrath all renewing
"We live as One Man;for contracting our infinite senses
"We behold multitude,or expanding, we behold as one,
"As One Man all the Universal Family,and that One Man
"We call Jesus the Christ; and he in us,and we in him,
"Live in perfect harmony in Eden, the land of life,
"Giving, recieving, & forgiving each other's trespasses."
(pl.38 (34) ll.16-22)

するとまず大聖堂都市ロンドンに宗教的情熱が蘇る。
ロンドンは

He says:"Return, Albion, return! I
give myself for thee:
" My streets are my Ideas of Imagination.
"Awake, Albion, awake! and let us awake up
together."
(pl.38 (34) ll.30-32)

と Albion を励ます。すると 24 の大聖堂都市にイエスを中心とする「神の家族」が次のように現れる。

And these the Twenty-four in whom the Divine Family
Appear'd;and they were One in Him, A Human Vision!
Human Divine, Jesus the Saviour, blessed for
ever and ever.
(pl.40 (36) ll.45-47)

さらに Blake は続けて

Selsey, true friend! who afterwards
submitted to be devour'd
By the waves of Despair, whose Emanation rose above
The flood and was nam'd Chichester, lovely
mild & gentle! Lo!
(ll.48-50)

と歌い一度は理性の波に屈したが、チチェスターとして再生したセルシーを祝福するのである。次にウィンチェスターも "Winchester stood devoting himself for Albion" (l.53) と活気を取り戻し Albion のために自分を捧げると約束する。

ところで 24 の大聖堂都市の中でバースへの Blake の評価は高く以下のように述べる。

Bath, mind Physician of Eternity, mysterious power,
Whose springs are unsearchable & knowledge infinite.
(pl.46 (41) ll.1-2)

このバースが詩的情熱を持って唯一閉じているゴルゴヌーザ (Golgonoosa) の西の門を通し深い「知恵」を語るのである¹¹⁾。

"And merciful the Individuality, however high
"Our palaces and cities and however fruitful
are our fields,
"In Selfhood, we are nothing, but fade away
in morning's breath.
"Our mildness is nothing: the greatest
mildness we can use
"Is incapable and nothing: none but the Lamb
of God can heal

"This dread disease, none but Jesus. O Lord,
descend and save!"
(pl.45 (40) ll.11-16)

一つだけ閉じている西の門は「舌の門」と呼ばれ
(pl.131.25)言葉と関わると思われる。Albion がバース
の語る言葉を深く味わい認識を深める時、西の門は開
き Albion は永遠界に飛翔し「イエスの宗教」へ覚醒
するのである。バースに続きヘリフォード、リンカー
ン、ダラム、カーライル、イーリー、オックスフォード
等の大聖堂都市も生命の息吹を湛え、Albion に心か
らの援助を次のように贈るのである。

Hereford, ancient Guardian of Wales, whose hands
Built the mountain palaces of Eden,
stupendous works!
Lincoln, Durham & Carlisle, Counsellors of Los,
And Ely, Scribe of Los, whose pen no other hand
Dare touch: Oxford, immortal Bard, with eloquence
Divine he wept over Albion speaking the words of God
In mild perswasion, bringing leaves of the Tree of Life.
(pl.46 (41) ll.3-9)

5. むすび

以上 Blake は第2章においてかつてはイエスが
存在する「神の国」であった英国が18世紀の理性至
上主義の嵐にもてあそばれ硬直化し「不完全な宗教」、
「独善的キリスト教」へと墮落するが、ふたたび「罪
の許し」を説く「真のキリスト教」、「イエスの宗教」
に覚醒していく様子を大聖堂都市のイメージを通して
描いていると言えよう。

註

Blake の作品からの引用は Geoffrey Keynes ed.,
The Complete Writings of William Blake (London: Oxford
University Press, 1969) による。

1) 拙著 「W. ブレイクの「エルサレム」について」
室蘭工業大学紀要 第47号 (1997年) を参照
のこと。

2) W.H.Stevenson ed., *The Poems of William Blake*,
(London: Longman Group Limited, 1971), p.676.

3) "emanation"は人間が互いに愛し合い結ばれるため
に必要な人間に内在する女性的分身である。
(S.F.Damon, *A Blake Dictionary: The Ideas and Symbols of
William Blake* (Providence, Rhode Island: Brown University
Press, 1965), pp.120-121.) 例えば Albion の4つの精神機
能 (=the four zoas) である Urizen (理性)、Luvah (情熱)、
Tharmas (肉体)、Los (詩的想像力)、はそれぞれ emanation
をもっており emanation と一つに融合することでおの
の機能を完全に果たすのである。この場合
emanation は zoa の生命力、本質を意味すると思われる。

4) S.F.Damon, *A Blake Dictionary*, p.109.

5) 拙著 「ブレイクの「四つのゾア」について」
「イギリス・ロマン派研究」第18号 (1994年)
参照のこと。

6) Damon, *A Blake Dictionary*, pp.181-182.

7) *The Complete Writings of William Blake*, p.387.

8) *A Blake Dictionary*, p.410.

9) 「創世記」22章 (1-12節)

10) J.R.H.ムアマン「イギリス教会史」、八代崇他共
訳 (聖公会出版、1991年) 365-366頁。

11) ゴルゴヌーザは Los が Albion を再生させるため
に建てた幻想的な芸術の都市である。そこにある東
西南北の門のうち、西の門だけは「最後の日」まで閉じ
ていられる。Damon, *A Blake Dictionary*,
pp.163-164.

„Siddhartha“ als Weltliteratur —eine vergleichende literaturwissenschaftliche Forschung

Hideshige OMURA and Malcel Wenzel CHALUPA

(Received 8 May 1998, Accepted 31 August 1998)

Hermann Hesse (1877-1962) was one of the modern greatest German authors who has had an idea of the worldliterature like Johann Wolfgang von Goethe, e. g. Hesse has written in "The library of the world literature" for the Reclam ; "Including the Bible known by everybody, I place in the beginning of this booklet a part of the ancient indian wisdom that people call Vedanta, End of Veda, in the form of selections from Upanishad. —Selected words of Buddha belong to it. —We choose from the ancient China the Analects of Confucius, The Taoism of Lao-tse and Dschuang of wonderful allegories". We can cite "Siddhartha" as the worldliterature. That novel published in 1922 is one of the worldliterature. The work is an important novel that is read unquestionable and most in this century—the Worldedition amounted to Millions of two figures at present (by Günter Baumann). It subsumes the following ideas: Hinduism, Buddhism, Christanism and Taoism. This work tries to interpret with the method of the interpretative theory that we understand literary works their immanent law, because the literary works aim for the realization of the authors' wishes in which their writing behaviors overcome the existent and real 'self' and acquire a new 'self' (by Kenzaburo Oe). And the study tries to explain "Siddhartha" with the comparative literature.

Keyword: Siddhartha, die Interpretation, die vergleichende
Literaturwissenschaft, die Weltliteratur

Einleitung

Ist es gut, wenn man utilitär und nützlich ist, wenn man so denkt und auch so handelt? Die Welt in der Gegenwart ist befangen in diesen Fragenkomplex. Sie befindet sich auf dem Wendepunkt. Die Frage der Nützlichkeit und Utilitarismus geht wie eine Welle über alle Erdteile und Seen. Die Menschheit beginnt zu verstehen, daß neben der Dringlichkeit der Wirtschaft, industrieller Entwicklung und Politik die Problematik des einvernehmlichen herzlichen Lebens. Also die soziale Qualität des Lebens, genau die selbe — wenn nicht entscheidende, — Bedeutung innehat. Der kulturelle Ausdruck ist einer der wichtigsten Erscheinungsformen dieser sozialen Qualität des Lebens. Einst hatte Johann Wolfgang von Goethe eine Vorstellung entwickelt, die Idee der „Weltliteratur“. Dabei hatte er vielleicht die europäische Literatur als die „Weltliteratur“ betrachtet. Die heutigen Romane wie „MoMo“ von Michael Ende oder „Sophies Verden“ von Jostein Gaarder werden weltweit gelesen. Diese Literatur hatte ihren Eingang in die Weltliteratur gefunden. Solch einer modernen großen Schriftsteller war Hermann Hesse.

So wie Johann W. von Goethe, auch Hermann Hesse hatte sich mit dem Ideal der „Weltliteratur“ beschäftigt. Als ein Schriftsteller der Gegenwart überschritt Hermann Hesse die

Grenzen der europäischen Schaffenskunst, um sich dem Ideal der Weltliteratur zu nähern und um dem Ziel Rechnung zu tragen. In dem Zusammenhang möchten wir auf Hesses „Bibliothek der Weltliteratur“ hinweisen, die er für Reclam schrieb.

„Außer der uns allen bekannten Bibel stelle ich an den Anfang unserer Sammlung jener Teil der altindischen Weisheit, den man Vedanta - ‚Ende des Veda‘ nennt, in Form einer Auswahl aus den Upanishaden. Die Auswahl aus den Reden Buddha gehört dazu. Aus den alten China wählen wir dann die Gespräche des Konfuzius, das berühmte Tao-Te-King des Lao-tse und die herrlichen Gleichnisse der Dschuang.“⁽¹⁾

Einer der bedeutenden Werke, die unter Hermann Hesses Feder 1922 entstanden, ist heutzutage mit Recht zu dem Begriff der „Weltliteratur“ gezählt. Die Erzählung „Siddhartha“, die 1922 veröffentlicht wurde, gehört zu der Weltliteratur der Gegenwart. Im Jahre 1997 hat Günter Baumann in „Hermann Hesse—Dichter und Weiser“ geschrieben: „das Werk gehört zweifelsohne zu den wichtigsten und meistgelesenen Texten dieses Jahrhunderts. Weltauflage hat mittlerweile zweistellige Millionen ziffern erreicht.“⁽²⁾ „Siddhartha —eine indische Dichtung“ ist die Erzählung, die unter den vielseitigen Einflüssen des Hinduismus, Buddhismus Christentum und Taoismus ihre Weisheit und tief sinnige Lebenslehre zu erzählen vermag. Der Weg, das Mühen und der Ziel —so wie das Kredo stellt es dar.

„Und so sah Govinda, dies Lächeln der Maske, dies Lächeln der Einheit über den Strömenden Gestaltungen, dies Lächeln der Gleichzeitigkeit über den Tausend Geburten und Toden. Dies Lächeln Siddharthas war genau dasselbe, war genau das gleiche, stille feine undurchdringliche, vielleicht gütige, vielleicht spöttische, weise, tausendfältige Lächeln Gotamas, des Buddha, wie er selbst es hundertmal mit Ehrfurcht gesehen hatte. So das wußte Govinda, lächelten die Vollendeten.“⁽³⁾

Die vorliegende Arbeit interpretiert mit der Methodik der Interpretation, den Grundgedanken der Dichtung, die das Werk und mit den immanenten Regeln aufklärt. Denn das Werk des Schriftstellers ist die Realisierung des Wunsches, durch das niedergeschriebene Wort und die Tat das wirkliche, daseiende Ich zu überwinden und das neue Ich zu erreichen.⁽⁴⁾ Damit versuchen wir eine vergleichende wissenschaftliche Forschung, um die asiatische und europäische Denkweise zu vergleichen.

1

Die neuzeitlichen Generationen haben die Sonnenenergie, die seit fünf Milliarden Jahren auf die Erde eingestrahlt wurde, seit fünfhundert Jahren konsumiert. Die Folgen des unproportionalen Energiekonsums sind heutzutage für jederman klar: Die Erwärmung der Umwelt mit allen negativen Folgen, das Entstehen des Ozonloches, das weiterhin zu den selben Problemen führt, und nochmal verstärkt. Sowohl die Erdumweltzerstörung wie auch die Umweltverschmutzung werden zu einer Vernichtung der modernen und zukünftigen Generationen führen. Betrachten wir die Geschichte modernen Menschen mit allen seinen Kataklysmen wie die Sklaverei, die unzählige Kriege, vor allem den ersten und zweiten Weltkrieg, müssen wir mit Erschütterung feststellen, daß diese Lebensgrundlage zur Zeit die schlimmsten Verbrechen übertreffen.⁽⁵⁾

Die Eingangsfrage, die wir uns gestellt haben— „ist es gut, wenn man utilitär und nützlich denkt und handelt?“ bleibt eine zentrale und wichtige Frage.

Wir, die uns den hochentwickelten Industrien untergeordnet haben, und deren auf „Verderb und Gnade“ ausgeliefert haben, leben ein zweifelhaftes Dasein. Die Folge dieser Entfremdung wendet sich dem Innenleben zu. Die Gewissen, die sowohl in Deutschland wie auch bei uns in Japan durch die zwei verheerenden Weltkriege gelitten hatten, so wie im Falle von Hermann Hesse, Thomas Mann, Mokichi Saitoh oder Shinobu Origuchi suchten „den Weg nach Innen“. Das zur Zeit bestehende Reelle und der Naturfremde konnten sie nicht akzeptieren. In vielen Fällen blieb die „Innere Emigration“ der Ausweg. So war es im Falle Hermann Hesse, seine Dichtung „Siddhartha“. Wir, die wir täglich das Verbrechen nahmens „die Umweltzerstörung“ begehen, sollten fähig sein, die Zweifel und Qual dieser Denker nachzuempfinden. Keiji Nishitani hatte in seinem Aufsatz „Goethe und Weltkultur“ geschrieben, daß die Gegenwart nicht nur das Gebiet des wirklichen Lebens beinhaltet, zu dem das politische oder wirtschaftliche Leben gehört, sondern auch das Geistesleben mit dem Problem der Seele innehat.⁽⁶⁾

Es wäre sinnvoll für uns, wenn wir alle, die die Verantwortung für die heutige Erdumweltzerstörung tragen, die Seelennot unserer Denker in den Weltkriegen nachempfinden könnten. In dem Zusammenhang schlägt Keiji Nishitani an Goethes Idee der „Weltliteratur“ die Idee der „Weltkultur“ vor. Wie schon früher erwähnt, Hermann Hesse besaß, die Idee des Begriffes „Weltliteratur“. Diese hatte einen tiefen Einfluß auf sein Werk „Siddhartha“ ausgeübt. Die folgende Schilderung erinnert uns direkt an Lao-tse Worte;

„Lange Zeit habe ich gebraucht und bin noch nicht damit zu Ende um dies zu lernen, o Govinda: daß man nicht lernen kann! Es gibt so glaube ich, in der Tat jenes Ding nicht, das wir >lernen< nennen. Es gibt, o mein Freund, nur ein Wissen. Das ist überall, Das ist Atman, Das ist in mir und in dir und in jedem Wesen. Und beginne ich zu glauben: Dies Wissen hat keinen ärgeren Feind als

Wissenwollen, als das Lernen.“⁽⁷⁾

Auch Lao-tse behauptet unvernünftige Weisheit, und lernt das unvernünftige Lernen.

„Brich ab das Lernen, so bist du Sorgenfrei.
Wie weit ist „Ja“ von „Hm“ entfernt?
Wie weit ist das Gut von Bösen entfernt?
Oder du weißt, daß weich stärker ist als hart,
Wasser stärker als Fels.....“⁽⁸⁾

Der Gedanke Lao-tse ist wie folgt.

„Das Weichste in der Welt überrennt das Härteste in der Existenz.
Nichts in der Welt ist so weich und schwach wie das Wasser.
Aber beim Angriff gegen das Harte und Starke,
Nichts übertrifft das Wasser, weil es durchaus unmöglich ist, die Natur des Wassers zu verändern.
Das Wasser, das keine bestimmte Form hat, dringt in das Lückenlose ein.
Daran erkenne ich den Vorteil der Weichheit.
Das Schwache besiegt den Starken.
Die Weiche besiegt den Harten.“⁽⁹⁾

Siddharthas Dichtung ist durchdrungen mit dieser Weisheit, die wir auch in Gespräch mit Vasudeva lesen können:

„Du zwingst ihn nicht, schlägst ihn nicht, befiehst ihn nicht, weil du weißt, daß weich stärker ist als hart, Wasser stärker als Fels, Liebe stärker als Gewalt. Sehr gut ich lobe dich“⁽¹⁰⁾

Übrigens stellt auch Goethe in „Faust“ spöttisch über die Vernunft dar:

„Ich sehe nur, wie sich die Menschen plagen.
Der kleine Gott der Welt bleibt stets von gleichem Schlag
Und ist so wunderlich als wie am ersten Tag.
Ein wenig besser würd' er leben,
Hättst du ihm nicht den Schein des Himmelslichts
gegeben;
Er nennt's Vernunft und braucht's allein,
Nur tierischer als jedes Tier zu sein.“⁽¹¹⁾

2

Zum Beginn des ersten Weltkrieges hatte Hesse ein Essay „o Freunde nicht diese Töne“ in einer Zeitung veröffentlicht. In diesem Essay behauptete Hesse, daß der Krieg den Untergang des Abendlandes wird. Natürlich wurde seine Meinung durch die damalige Öffentlichkeit abgelehnt. Die meisten Verlage haben abgelehnt, seine Schrift zu veröffentlichen. Hesse hatte an der öffentlichen Ablehnung, die ihn auch persönlich geschädigt hatte, schwer getragen. In dieser für ihn bewegten Zeit, begann Hesse an der Dichtung „Siddhartha“ zu arbeiten als an einen „Weg nach Innen“. Der erster Teil wurde dem großen französischen Schriftsteller Romain Rolland gewidmet.

Es versteht sich von selbst, daß Siddhartha der Name des Erleuchteten „Gotama Buddha“ ist und daß Hesse durch die Siddharthas Erleuchtung seinen Werdegang nacherleben will. Diese Dichtung, die das Leben des Gotama Buddha als eine parallele Erzählung nacherzählte, präsentiert Buddha in zweifachen Weise. Somit ist es, wie Hideo Minegishi verlautet eine Erzählung über „doppelten Buddha.“⁽¹²⁾ Der erhabene Buddha selbst erscheint in dieser Erzählung im Hintergrund.

„Sieh hier“ sagt Siddhartha leise zu Govinda. „Dieser hier ist der Buddha“. Aufmerksam blickte Govinda den Mönch in der gelben Kutte an, der sich in nichts von den Hunderten der Mönche, zu unterscheiden schien. Und bald erkannte auch Govinda: Dieser ist es, und sie folgten ihm nach ...der Buddha ging seines Weges bescheiden und Gedanken versunken, sein stilles Gesicht war weder

fröhlich noch traurig, es schien leise nach innen zu lächeln.¹³⁾

Eine beabsichtigte Spiegelung der Geschehnisse im Leben des Buddhas wird man aus zweifacher Sicht, als den Betrachteten und der Betrachter gezeigt. Dadurch kommt es zu einer Vertiefung und verbesserten Verständnis der indischen Kultur und Religion außerhalb von Indien.

Hesse, dessen Großvater und Vater lange Jahre in Indien als Missionare verbracht haben und dessen Mutter in Indien geboren war, hatte reiche Kenntnisse der indischen Sprache, Kultur und des Gedankengutes. Die Einflüsse des Buddhismus und dessen Lehre führte den Feder des Dichters.

„So wandelte Gotama der Stadt entgegen, um Almosen zu sammeln, und die beiden Samanas erkannten ihn einzig an der Vollkommenheit seiner Ruhe, an der Stille seiner Gestalt, in welcher kein Suchen, kein Wollen, kein Nachahmen kein Bemühen zu erkennen war, nur Licht und Frieden.... >Heute werden wir die Lehre aus seinem Munde vernehmen,< sagte Govinda. Mit sanfter, doch fester Stimme sprach der Erhabene, lehrte die vier Hauptsätze, lehrte den achtfachen Pfad.....“

Die Implikationen der buddhistischer Lehre im Leben des Individuums werden dann dem abendländischen Leser klar vorgeführt.

„Abgesagt hast du Heimat und Eltern, abgesagt Herkunft und Eigentum, abgesagt deinem eigenen Willen, abgesagt der Freundschaft, so will es die Lehre, so will es der Erhabene. So hast du selbst es gewollt“¹⁴⁾.

„Siddhartha“ ist in der indischen Kultur voll verankert. Diese hatte das Abendland umgefahren und in Japan angekommen war, so wie Philosophie Schopenhauer. Dr. Hajime Nakamura schrieb „Die Gesinnung, die Held Siddhartha hatte, schließt alle Gegensätze aus. Auf diese Weise kann man >upanischaden-und vedantahaft< sagen“¹⁶⁾. Im allgemeinen legt man das Werk vor dem persönlichen, gesellschaftlichen oder psychologischen Hintergrund aus. Der Forscher gehe allein das Wort des Dichters an, er habe sich nur das zu kümmern, was in der Sprache verwirklicht wurde.....Der Interpret aber muß auf wissenschaftlichen Weise etwas über die Dichtung aussagen, ihre Geheimnisse und ihre Schönheit, ohne sie zu zerstören, erschließt und mit der Erkenntnis zugleich die Lust am Wert des Sprach-Kunstwerkes vertieft¹⁷⁾..... Längst hatte uns die Hermeneutik gelernt, daß wir das Ganze aus dem Einzelnen, und das Einzelne aus dem Ganzen verstehen können.

3

Der Sohn des Bramanen (übrigens; Śakyamni Gotama Buddha stammte nicht aus einer bramanischen Familie. Und zwar „Siddhartha“ ist überhaupt nicht eine bibliografische Dichtung des realen Gotama Buddha, sondern als der gleichnamige, fiktive Fremde dargestellt) fragte selbst spontan nach Atman.

Wem anders war zu opfern, wem anders war Verehrung darzubringen als Ihm, dem Einzigen, dem Atman? Wo war Atman zu finden, wo wohnte Er, wo schlug Sein ewiges Herz? wo anders als im eigenen Ich, Innersten, im Unzerstörbaren, das ein jeder in sich trug? Aber wo, wo war dies Ich, dies Innerste, dies Letzte?¹⁸⁾

Diese Frage, dies war sein Durst, dies war sein Leiden. Eine Frage, die in jedermann wach wird, dessen „Ich“ zur Bewußtsein erwacht. Im allgemeinen stellen sich Inder vor, daß der Atman das persönliche und damit allgemeine Ich ist. Deshalb denken Inder, aus der Feststellung des persönlichen Ich gleichzeitig das allgemeine Ich abzuleiten. Durch die Seelenqual getrieben, geht Siddhartha zu den Samanas. Sein Ziel stand fest. Ein einziges Ziel stand vor ihm...leer werden....

„Ein Ziel stand vor Siddhartha ein einziges:leer werden, Leer von Durst, leer von Wunsch, leer von Traum, leer von Freude und Leid. Von sich selbst wegsterben, nicht mehr Ich sein, entleerten Herzens Ruhe zu finden.“¹⁹⁾

sein Ziel und seine Erwartungen sind eins:

„Wenn alles ich überwunden und gestorben war, wenn jede Sucht und jeder Trieb im Herzen schwieg, dann mußte das Letzte erwachen, das Innerste im Wesen, das nicht mehr ich ist, das große Geheimnis.“²⁰⁾

Dieser Ziel wird aber nicht erreicht. Keine einzelne Qual, kein glühende Schmerz, keine stoische Entsagung hatte zum Erwünschten geführt. Der Weg der Entselbstung durch den Schmerz, durch Erleiden, durch Hunger und Durst führte zum zeitweiligen Nicht-Ich. Und obwohl Siddhartha tausendmal dem Ich entflohen, er kehrte immer wieder zurück. Keine Mühe führte zum Durchbrechen des auferlegten Kreislaufes. Wahrlich bestand das subjektive Ich.

„Wahrlich, kein Ding in der Welt hat so viel meine Gedanken beschäftigt wie dieses mein Ich, dies Rätsel, daß ich lebe, daß ich einer und von allen anderen getrennt und abgesondert bin, daß ich Siddhartha bin! Und über kein Ding in der Welt weiß ich weniger als über mich, über Siddhartha!“²¹⁾

Das letzte Erwachen, die Wiedergeburt des innersten Wesens, das Ablegen des inneren Ich und die innere Einkehr...das ist das große Geheimnis. Die indische Denkweise ist der modernen europäischen nicht unähnlich. Sie widerspricht nicht dem Mahāyāna Buddhismus. In Mahāpāriniṣṭhā wird das geweihte Licht zum Ich, das geweihte Licht zum Dharma. Wenn man das Dharma des Menschen ausführt, verwirklicht sich das wahre Ich. Das einzige Ziel Siddharthas, leer zu werden, dauerte nur kürzere Zeit, vielleicht ein paar Tage, dann kehrte sein Ich zurück.

Nun ist der Gedanke der Upanisaden am verschiedensten, diese kann man nicht verschiedenlos zusammenfassen, aber die allgemeine Kennzeichnung der verschiedensten Gedanken ist es, auf die Weisheit (jñāna) größtes Gewicht zu legen. Syhyuh Kanaoka hatte zu den fünf Kernen der Upanisaden vorgestoßen.

- 1) Die Einstimmigkeit des Weltgeistes mit dem Ich.
- 2) Die Verleugnung der Vielseitigkeit und der Verschiedenheit der Außenwelt.
- 3) Die Erleuchtung mit der vijñāna.
- 4) Der Gedanke der Seelenverwandlung und der Karman.
- 5) Das große Gewicht auf die elementaren Kräfte, die das Ich und fünf Großen bilden, zu legen.²²⁾

Nachdem uns diese charakteristischen Merkmale bewußt werden, verstehen wir leicht, daß Siddhartha upanischaden-und vedantahaft ist. Seine Ausbildung zum Samana endet für ihn in einer durch ihn erkannten Sackgasse.

„Was ich bis zu diesem Tage bei den Samanas gelernt habe, das, o Govinda, hätte ich schneller und einfacher lernen können....was ist Versenkung?... Was ist Fasten? ...Es ist Flucht vor dem Ich,es ist ein kurzes Entrinnen aus der Qual des Ichseins, es ist eine kurze Betäubung gegen den Schmerz und die Unsinnigkeit des Lebens.“²³⁾

Dann trifft und spricht Siddhartha mit Gotama Buddha, und sagt.

„Ich habe nicht einen Augenblick gezweifelt, daß du Buddha bist. Daß du das Ziel erreicht hast.....sie ist dir geworden aus deinem eigenen Suchen, auf deinem eigenen Wege, durch Gedanken, durch Versenkung, durch Erkenntnis, durch Erleuchtung. Nicht ist sie dir Geworden durch! Und - so ist mein Gedanke. o, Erhabener - keinem wird Erlösung zuteil durch Lehre!“²⁴⁾

Letzten Endes ist Siddhartha mit dem Leben als Samana nicht zufrieden und geht in die gewöhnliche Welt zurück, um Kaufmann zu werden. Er war sein eigener Herr geworden. Das erinnert uns an das einsame Leiden von Arjuna der Bhagavad-gīta vor dem größten Krieg: Bhagavadgīta [Gesang Gottes] ist am Anfang der Mahābhārata Bd. 6. der Krieg Bhīṣma, der von nun an wie der erste Weltkrieg in Hesses Zeit ausbricht. Der Held Arjuna, der Mächtige Krieger, findet im Heer des Feindes seine Verwandte und seine verehrten Lehrerso will er nicht kämpfen und überleben, um sogar sie zu ermorden, sagt er seinem vertrauten Freund Kṛṣṇa [in Wahrheit die Verkörperung des Herrn der Götter], daß er nicht kämpfe. Siddharthas Handeln, in die gewöhnliche Welt zurückzugehen; als ob er gesagt hätte:

Dein Interesse [aber] sei nur auf das Handeln gerichtet, niemals auf dessen Früchte des Handelns Bestimmen, [aber] neige [auch] nicht zur Untätigkeit.²⁵⁾

Über die Bhagavadgīta hat Hermann Hesse ganz begeistert in „Eine Bibliothek der Weltliteratur“ für Reclam geschrieben.

„Von da aus suchte ich weiter, und bald tat ich den ersten Fund, ich las mit Herzklopfen eine Übersetzung der Bhagavadgīta. Es war schauerhafte Übersetzung, und bis heute kenne ich keine wirklich schöne, obwohl ich mehrere las, aber hier fand ich zum erstenmal ein Korn von dem Gold, das ich bei dieser Suche geahnt hatte: Ich entdeckte den asiatischen Einheitsgedanken in seiner indischen Gestalt. Von da an hörte ich auf, jene wichtigtuenden Schriftchen über Karma und Wiedergeburt zu lesen und mich über ihre Enge und Schulmeisterei zu ärgern; statt dessen suchte ich mir anzueignen, was mir an echten Quellen erreichbar war.“²⁶⁾

Die Rezeption des echten, großartigen Widerhalls der indisch-eligios-philosophischen Dichtung, in der Goethezeit keimgefeht, kam dann in der deutschen romantischen Schule in die Blütezeit. Friedrich Schlegel (1772-1829) glaubte, daß in der indischen Dichtung alle Wörter beinhaltet sind, die die Menschheit erschöpft hatte, die Quelle aller Gedanken und Dichtungen gesehen hätte. Nachdem August Wilhelm Schlegel (1769-1845) die Stellung des sanskritischen Professors, veröffentlichte er die Bhagavadgīta mit der lateinischen Übersetzung und die Rāmāyana. Und Wilhelm von Humboldt (1767-1835) veröffentlichte im Jahrgang 1827 in „Jahrbücher für Wissenschaftliche Kritik“ zwei ausführlichen Rezensionen, die ihrerseits die Dimensionen einer Monographie annehmen und zugleich eine ausführliche Kritische Auseinandersetzung mit dem Weltbild der Bhagavadgīta selbst bieten. Hesses „Siddhartha“ bestand in diesem Hauptfluß der deutschen Geistesgeschichte.

4

Siddhartha hatte gefunden, mit seinem Verständnis erfaßt, daß der eigene Weg, der Weg des Verständnisses, der Weg des bewußten Ichs, der Weisheit so wie Gedanken, nicht zu seiner Erleuchtung führt. Es war die innere Stimme, die Stimme des Atman, die er suchte und die auch Gotama Buddha seine Erleuchtung bescherte. Zu dieser Stimme, zu diesem Erfüllen führt nicht der Weg des Verstandes, der Weg, der mit Kasteiung oder Göttern verbunden ist. Für Siddhartha braucht noch mal Wiedergeburt. Bei ihm handelt es sich um die Summe des Erlebten, Erleideten und Gewordenen. Dieser für Siddhartha neue Lebensweg führt ihn in die materielle Welt mit all seinen profanen Problemen, Freuden zurück, die hohl sind, mit Wünschen, die zweifelhaft sind.

Siddhartha lernte Neues auf jedem Schritt seines Weges, denn die Welt war verwandelt, und sein Herz war bezaubert.²⁷⁾

Auch in dieser neuen Phase des Lebens, zeigt Hesse seine tiefe Kenntnis der buddhistischen Denkweise. Es ist die letzte

Einsicht, die er braucht, um Frieden zu finden, d. h. die Integration des Leidens in das gewöhnliche Konzept des Lebens. Siddhartha wirbt um die Liebe und Zuneigung einer schönen, von vielen begehrenden Kurtisane Kamala.

„Dies zu sagen, bin ich zu dir gekommen O Kamala! Du bist die erste Frau, zu welcher Siddhartha anders als mit niedergeschlagenen Augen redet. Nie mehr will ich meine Augen niederschlagen, wenn eine schöne Frau mir begegnet.“²⁸⁾

Aber ihre Gunst muß Siddhartha mit materiellen Gütern bezahlen. Die Arbeit, die er anschließend sucht und die ihn zum Kaufmann Kamaswami führt, um die notwendigen Güter zu bekommen, bringt ihn in den „Höhepunkt der Selbstentfremdung“.²⁹⁾ Das ständige Streben noch mehr die innere Unzufriedenheit, Lieblosigkeit zu seinen Umwelt bis zu ihm selbst: Diese negativen Einflüssen führen ihn bis zu Selbstverleugnung, und seine eigenen moralischen Aufgabe, daß er der Buddha werden wollte und viel geopfert hatte, um dieses Ziel zu erreichen, wird alles, was er so verabscheute. Ein unmoralischer und skrupelloser Mensch: Auch seine Liebe zur Kamala ist eine Anziehung, eine materielle Hingabe oder keine innere Zuwendung.

„Und dennoch lieber, bist ein Samana geblieben, dennoch liebst du mich nicht, du liebst keinen Menschen. Ist es nicht so? Es mag wohl so sein“, sagte Siddhartha müde, ich bin wie du. Auch du liebst nicht–wie könntest du sonst die Liebe als eine Kunst betreiben?“³⁰⁾

In dieser Umbruchzeit fühlt man den Einfluß von Hesses Erziehung und Beeinflussung, die er nur mit Widerwillen folgte und immer korrigieren versuchte. Der allgemeine und so auch in christlichen Gedanken wiederholte „Memento Mori“ wird auch im Leben Siddharthas zu dem gewünschten Umbruch führen, der ihn wieder auf seinen ursprünglichen Lebensweg führt.

„Sie waren unter den Bäumen gesessen, im Gespräch, und Kamala hatte nachdenkliche Worte gesagt, Worte hinter welchen sich eine Trauer und Müdigkeit verbarg.... Müdigkeit und beginnende Welke, und verheimlichte, noch nicht gesagte, vielleicht noch nicht einmal gewußte Bangigkeit: Furcht vor dem Alter, Furcht vor dem Herbste, Furcht vor dem Sterbenmüssen.“³¹⁾

Hier kann man ein christliches Element in diesem doch fernöstlichen Werke spüren. Hermann Hesses strikte, pietätische Erziehung in seinem Elternhaus haben ihn zeitlebens beschäftigt. Seine Gewissensschule, die ihn mit strenger religiöser Anschauung seiner Eltern erzogen hatte, ließen ihn nach der Wahrheit, nach dem Gegengewicht suchen. Das, was man in allgemeinen „Deutsche Pfarrhaus-Syndrom“ nennt, treibt ihn zu immer größeren Leistung, zur Selbstbestätigung und Kompensation von Minderwertigkeitskomplexen, die ihm seine Eltern in ihrem religiösen Wahn eingebracht haben. Die sich zum Freundschaft entwickelte Beziehung zu seinem Psychoanalytiker C. G. Jung bestärkt ihn nur in seinem Wunsch - den richtigen und unfehlbaren Weg zu finden und zu gehen. So wie Siddhartha, so auch Hesse sucht eine Erlösung - und Gnadenlehre. Hesse, sowie sein Held Siddhartha ist sich bewußt der Dekadenz und Korruption des Menschen und seines Geistes, der Überzeugung, die ihn dann zur göttlichen Gnade führt. Alles, was der Mensch die gesamte Humanität geistlich anfaßt, wird sozusagen kontaminierend, verunreinigt und zum Verfall verurteilt. Trotz dieser Erbsünde sind wir doch gerechtfertigt, auf die göttliche Gnade zu hoffen, die so für Hesse und Jung so wie für viele Menschen zur „Pforte des Paradieses“ wird. Für Siddhartha wird dieser Erlebnis mit Kamala ein entscheidender Wendepunkt in seinem-Leeren-Leben. Sein inneres Ich wird tief erschüttert und führt ihn in Unterbewußtsein, zum Ursprung seiner Seele.

„Wie lange hatte er diese Stimme nicht gehört, wie lange keine Höhe mehr erreicht, wie eben und öde war sein Weg

dahingegangen....

Da wußte Siddhartha, daß das Spiel zu Ende war, daß er es nicht mehr spielen könnte. „Ein Schauer lief ihm über den Leib, in seinem Inneren, so fühlte er, war etwas gestorben.“³³²

Die Akzeptation des Leidens in der christlichen Lehre ist ein Bestandteil, den auch der Buddhismus nicht abstreitet. Das Leiden als ein existenzielles Element des Lebens wird hier integriert, ohne das konzeptionelle Rahmen der Erzählung als eine „indische Dichtung“ zu sprengen. Das so vertane, selbstentfremdete Leben treibt ihn zu Verzweiflung mit einem Entschluß für eine Verzweiflungstat. Er ist entschlossen sein Leben zu beenden, denn er ist nicht fähig, seinem Gewissen, seiner inneren Stimme zu antworten. Er verläßt Kamala, von ihrer Liebe ist er nicht voll überzeugt, und verläßt die Stadt. In seiner Verzweiflung kommt er zu einer visionären Wiedergeburt.

„Ja, er war am Ende. Nichts mehr gab es für ihn, als sich auszulöschen, als das mißlungene Gebilde seines Lebens zu zerschlagen, es wegzuerwerfen.....“

„Er sank, mit geschlossenen Augen, dem Tod entgegen. Da zuckte aus entlegenen Bezirken seiner Seele, aus Vergangenheit seines ermüdeten Lebens her ein Klang. Es war ein Wort, eine Silbe, die er ohne Gedanken mit lallender Stimme vor sich hinsprach, das alte Anfangswort und Schlußwort aller brahmanischen Gebete, das heilige „Om“ das so viel bedeutet wie „Das Vollkommene“ oder die Vollendung. „Om!“ sprach er vor sich hin : „Om“ Und wußte um Brahman die Unzerstörbarkeit des Lebens, wußte um alles Göttliche wieder das er vergessen hatte.“³³³

Hesse, der Zeit seines Lebens selbst die Einheit in der Vielfalt, die Gnade gesucht hatte, fühlte sich bestätigt, daß diese noch ursprüngliche Denkweise zwischen den Völkern Asiens zu finden ist. Wie er den Verfall des Kirchlichen-Christentums in Europa betrachtet, und an dem vor allem die Unfähigkeit des freien Denkens, des Denkens ohne Richtlinien schuldig war, hatte Hesse während seiner Reise durch Asien die Stärke der religiösen Völker des Ostens gesehen. In seinen „Erinnerungen an Asien“ schrieb er:

„Überall erkennen wir die Überlegenheit unserer Zivilisation und Technik, und überall sehen wir die religiösen Völker des Ostens noch ein Gut genießen.“³⁴⁰

Er hatte wohl die Religiosität der indischen Bevölkerung gesehen und als ein Kultur-Psychische Vorteil erkannt. Unsere zu ausgeprägte Zuwendung zum Materialismus und materieller Überlegenheit steht auf tönernen Füßen. Er erwähnt weiterhin in dem selben Buch :

Ob Religion etwas sei, das überwunden und ersetzt werden könne, mag Frage bleiben. Daß Religion oder deren Ersatz das ist, was uns zutiefst fehlt, das ist mir nie so unerträglich klar geworden wie unter den Völkern Asiens.“³³⁵

Sicherlich ist doch seine religiöse Erziehung in seiner Bewertung bestimmend. So wie viele Europäer, kann auch Hesse nicht das Komplex Gott von den etablierten Religionen trennen. Das Glauben an Gott, an eine supreme, alles beherrschende Intelligenz ist auch bei ihm direkt verbunden mit einer durch den Menschen oft hergestellte undweisende Religion. Er sieht in Indien die praktische Seite, oder das praktische Ziel des religiösen Lebens:

„Der religiös gebundene und in sich ruhende Mensch ist der Überlegene.“³³⁶

An diese Maxime hält sich Hesse sein Leben lang. So wie in der inneren Einkehr von Siddhartha, sucht auch Hesse einen Weg zur Selbsterneuerung, einen Weg von allen religiösen Einflüssen oder Sekten des Heils.

Siddhartha bleibt am Flusse leben, das neue Leben, mit den weisen Fährmann Vasudeva. Er fühlt sich mit dem Fluß verbunden und ist bereit, die Geduld und Innerlichkeit von dem Fluß zu lernen. Im Vasudeva so wie an dem Fluß hatte Siddhartha etwas gefunden, was den menschlichen Seele oft fremd ist. Das ruhige Zuhören: Vasudeva lehnt Gelehrtheit ab, aber Vasudevas Weisheit kommt durch sein Alter und die Jahre, die er am Flusse verbracht hatte. Er hatte viele Menschen von einem Ufer zum anderen Ufer transportiert. Dieser Begriff kann man hier auch im übertragenen Sinne verstehen. Er ist dem Suchenden behilflich, er hilft bei den Veränderung des Lebens und seines Zieles. Er hat das „Zeitlose“ vom Fluß begriffen und gelernt:

„Hast du“, so fragte er ihn einst „hast auch du vom Flusse jenes Geheime gelernt: daß es keine Zeit gibt?“----- „Ja, Siddhartha“, sprach er. „es ist doch dieses, was du meinst : Daß der Fluß überall zugleich ist, am Ursprung und an der Mündung, am Wasserfall, an der Fähre, an der Stromschnelle, im Meer, im Gebirge, überall, zugleich, und daß es für ihn nur Gegenwart gibt, nicht den Schatten der Zukunft?“³³⁷

Siddhartha lernt vom Fluß die Einheit in der Vielfalt. Diese Schilderung erinnert uns ans Goethes Gedicht „Dauer im Wechsel“

Willst du nach den Früchten greifen,
Eilig nimm dein Teil davon!
Diese fangen an zu reifen
Und die andern Keimen schon;
Gleich mit jedem Regengusse
Ändert sich dein holdes Tal,
Ach, und in demselben Flusse
Schwimmst du nicht zum zweitenmal.³⁸¹

Der Fluß ist ein Symbol der Vergänglichen nicht nur in der deutschen Literatur, sondern auch in der japanischen Literatur: z. B. „Hohjohki“ von Kamo no Chohmei beginnt mit den folgenden Versen:

„Im fließenden Fluß herrscht ein ununterbrochener Strom und doch kein ehemaliges Wasser. Die auf dem Stau schwebenden Schäumchen sind einmal verschwindend, einmal entstehend und verweilen überhaupt nicht lange ebensowie die Menschen und ihre Wohnungen in der Welt.“³⁹¹

Sicherlich wie das Schlußwort von Goethes „Faust“:

„Alles Vergängliche
Ist nur ein Gleichnis“⁴⁰⁰

Die Einheit, die auch Hesse als Brüderlichkeit, besonders in den Jahren des ersten Weltkrieges, hervorgehoben hatte: Die Einheit des Menschen, die Hesse so stark und nachdrücklich während seiner Indienreise beeinflusste, wird für ihn ein Leitmotiv im seinen Denken. Siddhartha lernt das Ich d. h. das egoistisch auf sich bezogene Individuelle von Selbst als Inbegriff. Das Selbst im Ich ist das göttliche. Die Hindus benennen es „Atman“. Das göttliche unwandelbare und unsterbliche Selbst ist das Innere in der Psyche des Menschen. Diese Psyche als eine Verbindung zum Weltgeist ist der neue, nicht-christliche Weg zum Gott. Sicherlich kann man hier eine gewisse Haß-Liebe zur christlichen Lehre bei Hesse finden. Einerseits bestimmte seine christliche Erziehung seines Lebens, andererseits die Methode und Mittel, wie man ihm in den Kinderjahren die Erziehung beigebracht hatte, stößt ihn von dem selben ab und läßt ihn ein neuer Weg zum Gott suchen. So sucht auch Siddhartha seine Erlösung in der Einfachheit und Zeitlosigkeit des Flusses. Das Leben, wie er es nun kannte, für sich und um sich zentralisiert, wird nochmal durch das Erscheinen von seiner ehemaligen Geliebter Kamala und deren gemeinsamen Sohnes gestört. Kamala, die schon im fort-

geschrittenen Alter ist, sucht die Erlösung und psychische Genesung nun in den Lehren Gotama Buddha. Das sich Abwenden von Weltlichem und Zuwenden zum Psychischen ist wohl typisch im Menschlichen, vor allem im okzidentalischen Denken. Denn die grundsätzliche Lehre, die das Christentum lernt, ist das Seelenleben nach dem materiellen Leben. Diese Entwicklung kann man allerdings in manchen buddhistischen Sekten auch finden. Der Weg, Ziel und Grund des Lebens wird dann am besten aus dem Mysteriösen in das Lichte und Verständliche gebracht. Die abschließende Tragödie, in der Kamala in den Händen von Siddhartha stirbt und seinen Sohn ihn verläßt, um seinen eigenen Lebensweg zu suchen, schließt dem Lebenskreis zu, so wie es in allen menschlichen Kulturen üblich ist.

„du bist es, und bist es nicht.“

Siddhartha sprach nicht, still blickten seine Augen in die ihre.

„Du hast es erreicht?“ fragte sie. „Du hast Frieden gefunden?“

Er lächelte und legte seine Hand auf ihre.

„Ich sehe es“, sagte sie, „ich sehe es. Auch ich werde Frieden finden“.

„Du hast ihn schon gefunden“ sprach Siddhartha flüsternd.

Kamala blickte ihm unverwandt in die Augen. Sie dachte daran, daß sie zu Gotama hatte pilgern wollen, um das Gesicht eines Vollendeten zu sehen, um seinen Frieden zu atmen, und daß sie statt seiner nun ihn gefunden, und daß es gut war, ebenso gut, als wenn sie jenen gesehen hätte.⁴⁰⁾

Siddhartha hier nach vielen Jahren des Denkens, der inneren Ruhe und Ausgeglichenheit sicherlich auch durch die Lebensweisheit, die mit dem Leben im vorgeschrittenen Alter anhergeht, kommt zu seiner inneren Einsicht, zu dem Wesen der Weisheit. Die Bestätigung seiner Ausbildung wird dann durch das Treffen mit seinem Kindersfreund Govinda, der in seinen Augen die Erkenntnis sieht, wiederholt. Govinda küßt Siddhartha an die Stirn und erkennt dabei, daß Siddhartha das erreicht hatte, was er noch immer sucht. Hesse hatte hier eine Verbindung zwischen verschiedenen Religionen geschaffen. Von dem Psychologischen Aussichtspunkt betrachtet Hesse alle Religionen als mögliche Wege zum Gott. Siddharthas Leben ist im Dualismus gesetzt. Er befindet sich zwischen dem materiellen Leben und dem geistlichen Leben, sicherlich eine Teilung, die im Buddhismus nicht beheimatet ist.

6

Der Erfolg Siddharthas kulminiert, nach dem er beide Bereiche, den Materiellen wie den Geistlichen als Fehlschlag erkennt und erlebt. Das Bestreben ist das Überwinden des Ich, das immer noch zwischen den Menschen steht. Das Annähern und Einbeziehen von verschiedenen Ansichten und Auffassungen des religiösen Verständnisses machen die Gestalt Siddharthas verständlich sowohl für den Abendländer wie den Orientaler. Hesse hatte gesucht, die Grenzen und Religionen überschreitende Persönlichkeit zu formen, die sowohl die Einheit wie Gleichheit der Menschheit unterstreicht. Gleichzeitig spiegelt er seine generelle Verallgemeinerung von allen Religionen inklusive der Christlichen. Das Glaube an Gott als eine zentrale, überpersönliche Macht, die in jeden Menschen beheimatet ist: Seine religiöse Einstellung wird sichtbar im Buch „Besuch aus Indien“.

„Die Lehre Jesu und die Lehre Lao-tses, die Lehre der Veden und die Lehre Goethes ist in dem, worin sie das ewig Menschliche trifft, dieselbe. Es gibt nur eine Lehre. Es gibt nur eine Religion. Es gibt nur ein Glück. Tausend Formen, tausend Verkünder, aber nur einen Ruf, nur eine Stimme. Die Stimme Gottes kommt nicht vom Sinai und nicht aus der Bibel, das Wesen der Liebe, der Schönheit, der Heiligkeit liegt nicht im Christentum, nicht in der Antike, nicht bei Goethe nicht bei Tolstoi - Es liegt in dir, in dir und in mir, in jedem von uns. Dies ist die Alte, einzig

ewig gültige Wahrheit. Es ist die Lehre vom Himmelsreich, welches wir >inwendig in uns tragen<.“⁴²⁾

Den selben Gedanken kann man finden in Goethes Gedicht „Eins und Alles“.

Im Grenzenlosen sich zu finden,
Wird gern der Einzelne verschwinden,
Da löst sich aller Überdruß;
Statt heißem Wünschen, wildem Wollen,
Statt läst'gem Fordern, strengem Sollen,
Sich aufzugeben ist Genuß.

Weltseele, komm, uns zu durchdringen
Dann mit dem Weltgeist selbst zu ringen
Wird unsrer Kräfte Hochberuf.
Teilnehmend führen gute Geister
Gerinde leitend, höchste Meister
zu dem, der alles schafft und schuf.⁴³⁾

.....

Hesses allgemeine Ablehnung von allen religiösen Wegen, und vor allem die Ablehnung des Christentums, liegt mit Sicherheit an seinen traumatischen Erlebnissen aus seinem Elternhaus, wo das Christentum in einen bigotten Weise gelernt worden war. Hesse fand auch in den Zeiten des ersten Weltkrieges die Bodenlosigkeit und Verlorenheit fand, daß die bestehende Kirchen als Machtinstrumente und verzerrte Kreaturen zeigte, nicht um den Menschengenossen, sondern um politische Systeme zu stützen und zu retten. Fälschlich hat man hier in einer Ohnmacht die Unverständnis und sogar die Verantwortung für die menschliche Fehlleistung auf Gott schieben. Die logisch-naturalistische Einflüsse, die unsere Welt, unser Handeln und unser Sein bestimmen, wurden nicht voll anerkannt oder erkannt. Diese mächtigen Einflüsse und Lehren, die mit einer Mißverständnis gepaart haben, ließen viele Denker nach alternativen Religionen oder Wegen zum Gott treiben. Hesse als einer der wenigen lehnte alle alternative religiöse Importe vor allem aus Asien nach Europa ab. Obwohl er eine schon seit seiner Kindheit tiefe Zuneigung zum Buddhismus hatte, die einfache kritiklose Übernahme durch die Abendländer lehnte er ab. Sein Siddhartha durchlebt die spirituelle Entwicklung, die Hesse in den zwanziger Jahren durchlebt hatte. So wie am Ende seiner Erzählung Govinda, mit Hilfe von Siddhartha, sein Erlebnis der Einheit in der Vielheit erfährt, so auch Hesse erfährt nach vielen Jahren des Studiums der indischen Philosophie seine Einsicht. Seine Indonesienreise machte Hesse einem Weltbürger, zu einem großen Humanisten, der die Idee der Weltliteratur im wahren Sinne des Wortes erfüllt. Seine geistige Einstellung, sein klares Erkennen des ost-westlichen Kultur und religiös-philosophischen Gutes macht ihn gerade in heutigen Tagen aktuell.

In der Zeit, in der die Grenzen in zunehmendem Masse ihre Bedeutung verlieren und der zwischenmenschliche Kontakt auf breiter Basis durch neue bahnbrechenden Technologien entwickelt wird, ist das Verstehen der Kulturen und vielfältige religiöse Wurzeln von unbedingten Bedeutung. Die aktuelle Entwicklung in verschiedenen mittel- und südostasiatischen Ländern sowohl auch in den abendländischen Ländern zeigen, daß die generelle Ablehnung der Religionen, so wie des Islams und des Juden-Christentums, ist nicht der richtige Weg zur Genesung der Humanität, sondern im Gegenteil die Religion vielleicht die einzige moralisch-etische Basis für die Humanität zur Verfügung stellt. Der heutige Lauf zu religiösem Leben, das Gott als eine allesüberwiegende Intelligenz zum Mittelpunkt hat, nur die Insuffizienz des Menschlichen Geistes, eine gerechte und ausgewogene Gesellschaft aufzubauen.

Das Schlußwort

Hermann Hesse (1877-1962) war eine der größten, modernen deutschen Schriftsteller, der die Idee der Weltliteratur, wie Johann Wolfgang von Goethe, gehabt hatte. Auf diese Stelle ist erinnert an seine „Bibliothek der Weltliteratur“, die er für den Reclam Verlag geschrieben hatte. „Außer den uns bekannten

Bibel stelle ich an den Anfang unserer Bücherei jenen Teil der altindischen Weisheit, den man Vedanta, und Ende des Veda, nennt, in Form— eine Auswahl aus den Reden des Buddha gehört dazu— Aus alten China wählen wir die Gespräche des Konfuzius, das Tao-Te-King des Lao-tse und herrliche Gleichnisse des Dschuang.“ Zur Weltliteratur von Hermann Hesse kann man erheben „Siddhartha“. Die Erzählung, die 1922 veröffentlicht wurde, ist ein Werk, das gehört zweifelsohne zu den wichtigsten und auch meistgelesenen Texten dieses Jahrhunderts. Die Weltauflage hat mittlerweile zweistellige Million Ziffern erreicht (nach Günter Baumann). Sie besteht aus Hinduismus, Buddhismus und Christentum. Die vorliegende Arbeit interpretierte mit der Methodik der Interpretation, die das Werk mit den immanenten Regeln aufklärt. Denn die Arbeit der Schriftsteller ist die Realisierung des Wunsches, der durch die Wort für Wort schreibenden Tat über das daseiende, wirkliche Ich das neue Ich erreichen zu wollen (nach Kenzaburoh Ohe). Damit versuchte die vorliegende Arbeit das Werk „Siddhartha“ mit einer vergleichenden Wissenschaft zu forschen.

Anmerkungen

- 1) H.Hesse: Eine Bibliothek der Weltliteratur. Reclam 1929, S. 12.
- 2) G. Baumann: Hermann Hesse. Dichter und Weiser. Schöbeler Verlag 1997, S. 47.
- 3) H. Hesse: Siddhartha. Suhrkamp 1977, S. 136.
- 4) Kenzaburoh Ohe: Bungaku Nohto. Shinchohsha 1975, S. 87.
- 5) Hisatake Katoh: Kankyohrinrigaku no Susume. Maruzen Library, 1992, S. 37.
- 6) Keiji Nishitani: Gesammelte Werke Bd. 19 Sohbunsha 1981, S. 176ff.
- 7) Anmerkung 3) S. 21.
- 8) Lao-tse: Tao-Te-King. Aus dem chinesischen Text übersetzt von Tsutomu Itoh, Selbstverlag Kapitel 19.
- 9) Anmerkung 8) Kapitel 43 u. 78.
- 10) Anmerkung 3) S. 109.
- 11) J. W. v. Goethe: Hamburger Ausgabe. Bd. 3 S. 17.
- 12) Hideo Mineshima: Seiyohwa bukkyo wo dohtoraeruka. Tokyo Shoseki 1987, S. 178ff.
- 13) Anmerkung 3) S. 28f.
- 14) Anmerkung 3) S. 29f.
- 15) Anmerkung 3) S. 32.
- 16) Hajime Nakamura: Hikakushisohron. Iwanami Verlag 1960, S. 37.
- 17) E. Staiger: vgl. Die Kunst der Interpretation. Atlantis 1963. S. 9ff.
- 18) Anmerkung 3) S. 9.
- 19) Anmerkung 3) S. 16.
- 20) Anmerkung 3) S. 16f.
- 21) Anmerkung 3) S. 38.
- 22) Schuhyuh Kanaoka: Indotetsugakushi. Kohseisyuppan 1990, S. 120ff.
- 23) Anmerkung 3) S. 19.
- 24) Anmerkung 3) S. 34.
- 25) Bhgavadgita; Übersetzt von Richard Garbe, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt 1988, S. 89.
- 26) Anmerkung 1) S. 38.
- 27) Anmerkung 3) S. 45.
- 28) Anmerkung 3) S. 52.
- 29) Anmerkung 2) S. 46.
- 30) Anmerkung 3) S. 69.
- 31) Anmerkung 3) S. 74f.
- 32) Anmerkung 3) S. 78.
- 33) Anmerkung 3) S. 81f.
- 34) Erinnerungen, Träume, Gedanken von C. G. Jung. Aufgezeichnet und herausgegeben v. A. Jaffe. Olten 1971, S. 46f.
- 35) Erinnerung an Asien. (1914) In: Aus Indien S. 203f.
- 36) Anmerkung 2) S. 110.
- 37) Anmerkung 3) S. 98.
- 38) J. W. v. Goethe: Hamburger Ausgabe Bd. 1. S. 247f.
- 39) Nihon Kotenbungaku Taikai(Iwanami Verlag) Bd.30,S.23.
- 40) J. W. v. Goethe: Hamburger Ausgabe Bd. 3, S. 364.
- 41) Anmerkung 3) S. 104.
- 42) H. Hesse: Gesammelte Werke Bd. 8, S. 286.
- 43) Anmerkung 38) S. 368f.

世界文学としての「シッダールタ」

— 比較文学的研究序論

大村英繁 マルセル・W・シャルーバ

概要

ヘルマン・ヘッセ (1877-1962) は、J. W. v. ゲーテと同じく「世界文学」の理念を持った現代ドイツの文豪の一人である。例えば、レクラム文庫によせた「世界文学の図書館」という彼の小冊子に、「私達がよく知っている聖書に加えて、私はこの小冊子の冒頭にヴェダ-ンタ、ウパニシャッドと呼ばれる古代インドの知恵、ブッダの言葉の心髄、古代中国からは論語、老子、荘子の寓話を紹介しよう。」ヘルマン・ヘッセの「世界文学」としては、「シッダールタ」を挙げられる。1922年に出版されたこの短篇小説は確かに今世紀における極めて重要な、かつ最もよく読まれている作品の一つであり、全世界における発行部数は一千万部を超える(ギュンター・パウマン)。この作品はヒンズー教、仏教、キリスト教を包摂する。本稿は、文学作品をその内在法則により解釈する Interpretation の方法論にもとづいて論究する。なぜならば文学作品というものは小説を一行、一行書いていく行動が、現にあるような自分を乗り越えて、新しい自分にいたい、という願いの、現実化(大江健三郎)だからである。同時に本論は、作品「シッダールタ」についての比較文学的研究をめざすものである。

キーワード: ヘルマン・ヘッセ、世界文学、シッダールタ

室蘭工業大学共通講座

Prenuclear elements in Hawaiian noun phrases

Toru SHIONOYA*

(Received 8 May 1998, Accepted 31 August 1998)

A noun phrase in Hawaiian can be divided into three elements: (1) Prenuclear elements, (2) a nuclear noun, and (3) postnuclear elements, in sequential order. In the present paper, I attempt to give an inventory of all possible combinations of prenuclear elements. Word classes which occupy a prenuclear position in a noun phrase include prepositions, determiners, plural markers, a paucal marker, and preposed modifiers. The sequential order among prenuclear elements and a nuclear noun can be schematized as: \pm preposition \pm determiner \pm plural marker \pm paucal marker \pm preposed modifier + nuclear noun. I also show a few words which do not fit into a single word class, but can be analyzed into two word classes.

Keywords: Hawaiian, Noun Phrase, Prenuclear element

1 INTRODUCTION

1.1 Structure of a noun phrase

In Polynesian linguistics, the term 'noun phrase' is often used in a peculiar sense, in which the noun phrase and the prepositional phrase overlap. For example, Elbert and Pukui⁽¹⁾ interpreted the preposition as an optional element of a noun phrase. In the present paper, I do not intend to discuss the distinction between a noun phrase and a prepositional phrase, but I tentatively assume that the preposition is an optional element of a noun phrase.

I divide a noun phrase into three elements: (i) prenuclear elements, (ii) a nuclear noun, and (iii) postnuclear elements, in sequential order. For example:

(1)...i 'ike nā kanaka i ke ala pololei...
ASP see ART/PL person OBL the way right
'...so that people could see the right way...' LH
2/14/1834:1

The noun phrase *i ke ala pololei* has two prenuclear elements *i* and *ke*, a nuclear noun *ala*, and a postnuclear element *pololei*. Some noun phrases have no postnuclear element:

(2)...e lawe mai i kāna mau wahi ukana.
IMP bring DIR ACC his PL PAU luggage
'...(he) brought his luggage.' L 367

The noun phrase *kāna mau wahi ukana* in (2) has three prenuclear elements (i.e. *kāna*, *mau*, and *wahi*) and the nuclear noun *ukana*. It has no postnuclear element. Other noun phrases have nothing but a nuclear noun:

(3) E aloha aku kākou iā Iehova
IMP love DIR we ACC Jehovah
'Let's love Jehovah.' MA 2

In (3), *kākou* is the nuclear noun and it is the only element in the noun phrase. The structure of a noun phrase is schematized as follows:

(4) \pm prenuclear element(s) + nuclear noun \pm postnuclear element(s)

The symbol ' \pm ' indicates that the following element is an optional element, while the symbol '+' indicates that the following element is an obligatory element.

1.2 Purpose of this study

The goal of this study is to describe the internal structure of Hawaiian noun phrases, focusing on the prenuclear elements. In other words, I attempt to give an inventory of all possible combinations of prenuclear elements in Hawaiian noun phrases. In doing so, I intend to achieve three tasks: (i) to establish word classes which occupy a prenuclear position in a noun phrase, (ii) to give an inventory of each word class, and (iii) to show the sequential order of those word classes.

1.3 Previous works

In earlier works including Hale⁽²⁾, Andrews⁽³⁾, and Alexander⁽⁴⁾, the noun phrase was not a primary unit in the grammar. Although they discussed a number of words that can be placed before or after nouns, they did not show the overall structure of noun phrases. Most of them did not even mention the unit 'noun phrase'.

Elbert and Pukui⁽⁵⁾ gave the most comprehensive description of the internal structure of noun phrases. According to them, the sequential order of preposed elements is schematized as:

(5) \pm Prepositions \pm Determiners \pm Numerals \pm Particles \pm Ø-possessives \pm Plurals

*Common Subject Division

Although this generalization gives us the overall picture of the prenuclear elements in a noun phrase, a number of amendments are needed in order to obtain a more precise prediction. For example, it predicts a combination such as Preposition + Determiner + Numeral + Ø-possessive, which is not found in the data. I use this generalization as a starting point and attempt to advance a more precise generalization.

1.4 Sources of data

The sources of my data are Hawaiian texts written from the 1820s to the modern period, which include stories, laws, and newspapers.

The oldest source is a collection of short speeches titled *Manao o ke Alii*, which is dated 1827. The texts written in the 1830s include excerpts from the newspapers *Ke kumu Hawaii*, *Ke kumu kamalii*, and *Na holoholona wawae eha*. *Na holoholona wawae eha* (Mo'okini 1985) is a description of various animals which is originally from the articles in the newspaper *Ka lama Hawaii*. Some examples are from *Ka moolelo Hawaii* (Malo 1987), which was presumably written in the 1830s. The sources written in the 1840s include *Ao kiko*, *Na haiao*, *Hawaiian constitution and laws*, *He mau palapala aina a me na niele e pili ana*. Texts written in the 1850s and the 1860s include *The Hawaiian romance of Laieikawai* (Beckwith 1919) (which is originally published as *Ke kaao o Laieikawai* (Haleole 1863), *Moolelo no Kamapuaa* (Kahiolo 1978), *Kepelino's tradition of Hawaii* (Beckwith 1932), *Selection from Fornander* (Elbert 1959), and some excerpts from the newspaper *Kuokoa*. Texts written from the 1890s to the early 1900s include some excerpts from the newspaper *Kuokoa*, *Moolelo Hawaii no Kalapana* (Nakuina 1902), *Moolelo Hawaii o Pakaa a me KuaPakaa* (Nakuina 1990), and excerpts from the newspaper *Ka hoku o Hawaii*. The texts that belong to the later period include two collections of stories: *Folk tales of Hawaii* (Pukui and Green 1995), and *Lei Momi o 'Ewa* (Nakoa 1979).

The orthography in most of the texts I used does not mark the glottal stop (which is marked by ' in the modern orthography) and long vowels (which are marked by a macron in the modern orthography). I attempted to restore as many of those as possible.

2. INVENTORY OF PRENUCLEAR ELEMENTS

2.1 Outline

The optional elements which occur before a nuclear noun are prenuclear elements. They include: (i) prepositions, (ii) determiners, (iii) plural markers, (iv) a paucal marker, and (v) preposed modifiers. Two or more elements belonging to one of these four groups cannot be used together. If the nuclear noun is a pronoun or a locational noun, it cannot be preceded by a prenuclear element.

2.2 Prepositions

A preposition can occur at the beginning of a noun phrase. I do not intend to discuss the detailed function of prepositions in this paper. The purpose of this section is to give an inventory of prepositions. The prepositions include *a* 'of', *o* 'of', *ā* 'up to', *e* (agentive), *ē* (vocative), *i* (oblique), *iā* (accusative / oblique), *iō* (accusative/oblique), *ma* (locative), *mai* 'from', *me* 'with', *na* 'for / belonging to', *no* 'for / belonging to', and *o* (neutral case marker).

Some prepositions combine with the personal pronoun *au* 'I', *oe* 'you' or *ia* 'he/she' to form a combined form. Combined forms include *ia'u* (*i* + *au*), *io'u* (*iō* + *a'u*), *a'u* (*a* + *au*), *āu* (*a* + *oe*), *āna* (*a* + *ia*), *o'u* (*o* + *au*), *ou* (*o* + *oe*), *na'u* (*na* + *au*), *nau* (*na* + *oe*), *nāna* (*na* + *ia*), *no'u* (*no* + *au*), *nou* (*no* + *oe*) and *nona* (*no* + *ia*). Since these forms are equivalents for Preposition + Pronoun, they are considered as noun phrases.

I give a brief description of the neutral case marker *o*, since it is peculiar to Polynesian languages. The neutral case marker *o* is a preposition with no specific meaning. Although *o* has no specific meaning, there are two uses of the neutral case marker *o*, which include (i) a noun marker, and (ii) a substitute for a copula. As a noun marker, *o* is used with a noun which is not preceded by any other preposition. If the nuclear noun is a proper name, it is mandatorily preceded by the neutral case marker *o* as a noun marker.

- (6) Ua hele 'o Kehopu i Honuaula..
ASP go NC Kehopu OBL Honuaula
'Kehopu went to Honuaula...' AK 4/21/1870:1

In (6), the subject is a proper name *Kehopu*, which is not marked by any other preposition. Therefore, *o* as the noun marker is used before *Kehopu*. If a proper name is the complement of the verb *kapa* 'call, name', it is preceded by *o* as the noun marker.

- (7) ...a kapa iho la 'o Laieikawai.
and call DIR Po-DEM NC Laieikawai
'...and (they) called her Laieikawai.' L 349

Since there is no preposition which particularly marks the complement of the verb denoting calling or naming, the neutral case marker *o*, as the noun marker, is used. The neutral case marker *o* used with the third person singular pronoun *ia* is also an example of the use of *o* as a noun marker.

- (8) Ua hānau 'ia 'o ia i ka lā 3
ASP give birth PAS NC he OBL the day 3
o Novemaba...
of November
'He was born on November 3rd...' NK 11/11/1893:1

Noun phrases that do not have other prepositions are occasionally preceded by *o* as the noun marker.

- (9) 'A'ole puka moākāka 'o ka hua'ōlelo.
not come out clearly NC the word
'The word does not come out clearly.' FH 156

The use of *o* as the noun marker before common nouns is optional. Common nouns do not need the noun marker, because they are usually preceded by a determiner, which indicates that a noun is following it. Among noncommon nouns, the proper noun is the only open class that contains an infinite number of members. That, probably, is the reason *o* as the noun marker is necessary before proper nouns.

There is no copula in Hawaiian. In expressing an equation ($A=B$ 'A is B'), the preposition *o* is used as a substitute for a copula. As other prepositions can introduce a prepositional predicate, the neutral case marker *o* can also do so. Therefore, a noun phrase can be changed into a predicate by adding *o*.

- (10) 'O ka wai o ka lehua kāna 'ai.
NC the honey of the lehua its food
'Its food is the honey of the lehua flower.'
NK 6/6/1863:1

2.3 Determiners

2.3.1 Definite singular articles Definite singular articles include *ka* and *ke*. The article *ke* is used before nouns beginning with the sound *k*, *a*, *e*, or *o* (e.g. *ke kanaka* 'the person', *ke ao* 'the cloud', *ke ea* 'the sovereignty', *ke ola* 'the life'). The article *ka* is used otherwise. However, there are some exceptions which take *ke*, even though they do not begin with the sound *k*, *a*, *e*, or *o* (e.g. *ke po'o* 'the head', *ke 'ano* 'the kind'). When a numeral is used as a nuclear noun, the definite singular article seems to be the only possible choice from prenuclear elements.

- (11) ...i ka lua o ke kaikaina...
to the two of the (younger) sister
'... to the 2nd younger sister...' FH 108

I have found no instance of numerals used with any prenuclear element other than the article *ka/ke*. Occasionally, the article *ka/ke* is used with a nuclear noun referring to the plural entities.

- (12) ...ua pāpa'a ka 'uala i kapuahi...
ASP burned the potato OBL fire
'... the potatoes were burnt in the fire...' FH 152

Although *ka* 'uala in (12) refers to potatoes, not a single potato, the definite singular article *ka* is used. The indication of the plurality is not very strict.

2.3.2 Definite plural articles The definite plural article is *nā*, which is usually used not succeeded by a plural marker. The article *nā* is used only in the plural meaning, while the definite singular article *ka/ke* may be used in either the singular or plural meaning.

- (13) ...ua nui wale nā mana.
ASP many just ART/PL version
'... the versions are so many.' KT 9

Another definite plural article is *kau* 'some', which is often used with the noun *wahi* 'place', as in (14), or the paucal marker *wahi*, as in (15).

- (14) Ua ho'ā'o 'ia ke kamelo ma kau wahi o
ASP try PAS the camel OBL some place of
Europa.
Europe
'The camel was tried at some places in Europe.' HW 29
(15) ...i kau mau wahi 'āina li'ili'i o Hilo.
OBL some PL PAU land small of Hilo
'... some small lands of Hilo.' PK 31

Note that *wahi* in (4) is a noun meaning 'place', while *wahi* in (5) is a paucal marker. There are a series of nouns which seem to contain *kau*. Since *kau* is a determiner, those nouns are often used without any determiner.

- (16) ...ka pūnohu ma luna o kaupoku hale.
the smoke OBL above of ridgepole house
'... the smoke above the ridgepole of house.' FH 144
(17) E nānā a'e nō 'oe i kauhale nei...
IMP look DIR INT you OBL house this
'You see this house...' FH 111

Although proper nouns are rarely preceded by an article, *nā* is occasionally used with a proper name if there is a group of partially identical proper names.

- (18) ...e noho ana nā Hi'iaka.
IMP stay Po- DEM ART/PL Hi'iaka
'... Hi'iakas are staying.'

In (18), *nā Hi'iaka* refers to three sisters whose names begin with *Hi'iaka* (i.e. *Hi'iaka*, *Hi'iakaikapuaaneane* and *Hi'iakaikapoliopole*.) Kalani Akana (p.c.) pointed out that *nā* can also be used with some place names; for example *nā Kona*, which refers to *Kona 'ākau* 'North Kona' and *Kona hema* 'South Kona' and *nā Hilo*, which refers to *Hilo 'ākau* 'North Hilo' and *Hilo hema* 'South Hilo'.

2.3.3 Demonstratives

There are two kinds of demonstratives: (1) deictic demonstratives and (2) anaphoric demonstratives. The deictic demonstratives include *kēia* 'this', *kēlā* 'that (far from the speaker and the addressee)', *kēnā* 'that (near the addressee)'. Since the demonstratives are determiners, they can be used with other prenuclear elements such as the plural marker, as in (19), or the paucal marker, as in (20).

- (19) ...na kēia mau akua pono 'ī nō i hana..
for this PL god proper INT ASP make
'...it is these proper gods who made ...' KT 11
(20) A e 'ike nō kākou ma kēia wahi mo'olelo..
and ASP see INT we OBL this PAU story
'And we actually see in this short story...' KT 9

There are some deictic demonstratives rarely used, which include *nā* 'that (near the addressee)', as shown in (21), *nei* 'this', as shown in (22), and *neia* 'this', as shown in (23).

- (21) No hea lā nā keiki?
from where INT that child
'Where is that child from?' SF 243

- (22) ...ma ka pō wale nō e kani ai nei mea kani
OBL the night INT ASP sound AP this instrument
'... it is only in the night when this instrument sounds.'
L 437

- (23) ...nā ali'i o neia mau 'āina.
ART/PL chief of these PL land
'...the chiefs of these lands.' MA 6

The anaphoric demonstratives include *ia* and *ua*, meaning 'that (aforementioned)'.

- (24) ...ua makau loa ia wahi elemakule..
ASP frightened very AD PAU old man
'...that (aforementioned) old man was very frightened...'
SF 147
(25) ...'ī mai nei na'e 'o ua Poliahu iā māua..
say DIR Po-DEM INT NC AD Poliahu OBL us
'... that (aforementioned) Poliahu said to us...' L 475

Although proper names are usually used with no prenuclear element, the anaphoric demonstrative *ua* can be occasionally used with a proper name as shown in (25).

The demonstrative *ua* is often used with postnuclear demonstratives *nei* 'near' or *ala ~ la ~ lā* 'far'.

- (26) ...hea hou aku la nō 'o ia i ua
call again DIR Po-DEM INT NC he OBL AD
mau akua nei..
PL god this
'...he again called these (aforementioned) gods...' FH 106
(27) ua mau kanaka ala o Kauai mai
AD PL person DEM of Kauai DIR
'those people form Kauai' SF 49

(24)-(27) show that the anaphoric demonstratives can be used with other prenuclear elements such as the paucal marker *wahi*, as seen in (24), or the plural marker *mau*, as in (15)-(17).

2.3.4 kekahi and kahi "some, a certain, one" The word *kekahi* can occur as the determiner of a noun phrase.

- (28) 'O 'Ahikananā ka inoa o kekahi wahine..
NC 'Ahikananā the name of one woman
'One woman's name is 'Akahinānā.' FH 107

Similar to other determiners, *kekahi* can be used with other prenuclear elements such as the plural marker *mau* or the paucal marker *wahi*.

- (29) I ki'i mai nei au i kekahi mau
ASP fetch DIR DEM I OBL some PL
kiko'o pana 'iole a kaua..
rat shooting arrow of we
'I came to get some of our rat shooting arrow...' SF 59
(30) kekahi wahi mo'olelo akamai no ka hopu 'ana
some PAU story wise for the catch GER
'some short stories for catching' NK 2/7/1863:1

The word *kahi* can be also used as the determiner, although it is less common than *kekahi*.

- (31) Malia e loa'a ai kahi 'a'ama..
maybe ASP be gotten AP some crab
'Maybe (I) get some crabs...' FH 116

Similar to *kekahi*, *kahi* can be used with the plural marker *mau*.

- (32) ...ua koe nō paha kahi mau i'a..
ASP remain INT perhaps some PL fish
'...perhaps, some fish remained..' Malo 34

However, I have found no instance of *kahi* used with the paucal marker *wahi*.

2.3.5 Possessives There are two kinds of possessives used as determiners, which include (1) *k*-possessives and (2) *ō*-

possessives. The k-possessives can be formed by noun phrases preceded by *kā* or *kō* (e.g. *kā Malia* 'Malia's').

- (33) ...*o ia kā Olopana kahuna i ka wā...*
NC he k-POS Olopana priest OBL the time
'... he was Olopana's priest at the time...' SF 203

The k-possessives for 'my, your, his/her/its' have special forms: *ka'u*, *ko'u* or *ku'u* for 'my', *kāu*, *kou* or *kō* for 'your', and *kāna* or *kona* for 'his/her/its'. The possessives *ku'u* and *kō* are sometimes used to express affection.

Possessives can be used with other prenuclear elements such as the plural marker, as in (34) or the paucal marker as in (35).

- (34) ...*ho'olale a'e la ia i kāna mau*
order DIR Po-DEM he OBL his PL
'ā'ipu'upu'u 'elua.
steward two
'... he ordered to his two of his steward.' SF 91
(35) ...*ke ha'i aku nei au iā 'oukou i ko'u*
ASP tell DIR Po-DEM I OBL you OBL my
wahi mana'o...
PAU thought
'... I'm telling you my small thoughts...' MA 7

Possessives may also contain more complicated noun phrases.

- (36) *Ko ke ali'i 'o Umi ka'apuni 'ana...*
k-POS the king NC Umi go around GER
'the chief Umi's going around...' SF 149

In (36), the possessive *ko ke ali'i 'o Umi* contains the noun phrase *ke ali'i 'o Umi*, which includes the determiner *ke*, the nuclear noun *ali'i* and the modifying phrase *'o Umi*. A nuclear noun may be omitted after a possessive, if it is understood. In such cases, even longer noun phrases may make up possessives.

- (37) ...*ma mua o ko nā lio 'ē*
OBL front of k-POS ART/PL horse different
apau i like ko lākou nui me kona..
all ASP like their size with his
'... more than all other horses whose size are similar to his size...' HW 61

In (37), the phrase *ko nā lio 'ē apau i like ko lākou nui me kona* forms a long possessive, meaning '(the thing) of all other horses whose sizes are similar to his size'. The nuclear noun is omitted after it.

The Ø-possessives are prepositional phrases which are formed by a noun phrase preceded by the possessive preposition *a* or *o*, including the contracted forms listed in section 2.2. According to Elbert and Pukui⁽⁶⁾, the k-possessives have the features 'definite' and 'singular', while Ø-possessives do not have those features. The Ø-possessives occur as a determiner if the definiteness and singularity of the nuclear noun do not matter, such as: (i) with a subject noun phrase of a numeral in the predicate use or (ii) with a subject noun phrase of a verb *'a'ohe* 'there is no'.

- (38) *He 'elua āna mau kaikamahine nunui ikaika.*
two his PL girl big strong
'He has two big strong girls.' FH 145
(39) ...*'a'ohe a'u keiki 'ē a'e...*
there is no my child different DIR
'... I have no other children.' MK 151

However, the Ø-possessives for the first and second person singular may occasionally occur with nouns in the definite meaning, if they are used with nuclear nouns which refer to plural entities.

- (40) *Ē o'u mau kānaka...*
VOC my PL people
'Oh my people...' FH 119
(41) *'O 'oe ka mea e loa'a ai a'u*
NC you the thing ASP be gotten AP my

wahine...
wife

- 'You are the one by which my wives are gotten...' SF 229
(42) *E nana mai i ou mau pōki'i?*
IMP look DIR OBL your PL sister
'Look at your younger sisters' L 423
(43) ...*'o au wahine wale nō kē noho me 'oe...*
NC you wife INT the one who stay with you
'...the ones who stay with you are only your wives...' SF 177

In (40)–(43), the Ø-possessives are used with nuclear nouns which refer to plural entities. I have found no instance of the similar use of the Ø-possessives in the singular meaning. If this use is limited to the plural noun, it suggests that the Ø-possessives can be also used to express the plurality.

2.3.6 Numerals Although a numeral is more often used as a verb or a modifier of a noun, it can also occur as a determiner.

- (44) *Ua ka'awale lākou i 'eono mau papa.*
ASP separate they OBL six PL class
'They are separated into six classes.' LH 2/14/1834:3

In (44), the numeral *'eono* in the noun phrase *i 'eono mau papa* is used as a determiner, which is followed by the plural marker *mau* and the nuclear noun *papa*.

The numeral *ho'okahi* 'one' is often used as a determiner.

- (45) ...*i ho'okahi kapuai paha.*
OBL one feet perhaps
'... perhaps to one foot.' HW 11

2.4 Plural markers

The most common plural marker is *mau*. The plural marker *mau* can be used with demonstratives, as shown in section 2.3.3, with *kekahi* or *kahi*, as shown in section 2.3.4, with possessives, as shown in section 2.3.5.

The lesser used plural marker is *po'e*. The plural marker *po'e* can be used with various determiners, such as demonstratives, as seen in (46), k-possessives, as in (47), *kekahi* 'some', as in (48), *he* (which is equivalent to the combination of preposition + determiner), as in (49), or the definite singular article *ka*, as in (50).

- (46) *kēia po'e alii ho'oluhi*
this PL chief exhaust
'these chiefs who exhaust (people)' FH 133
(47) ...*e malama i ko 'oukou po'e uhane.*
IMP take care OBL k-POS you PL spirit
'... take care of your spirits.' H 3
(48) ...*ua pau kekahi po'e hale.*
ASP finished some PL house
'...some houses were finished.' FH 114
(49) *He po'e lio lokomaikai loa lakou...*
NC-INDEF PL horse kind very they
'They are very kind horses...' HW 37
(50) *'I aku la ka po'e kaikaina...*
say DIR Po-DEM the PL younger brother
'Younger brothers said...' MK 57

As mentioned in section 2.3.2, the word *kau* is usually used as a determiner. It can rarely be used as a plural marker. If so, it is used with the definite singular article *ke*.

- (51) ...*i ke kau wahi hapa o nā mea*
OBL the some PAU portion of ART/PL thing
o ka wā kahiko...
of the time ancient
'... some portion of the things of the ancient time...' KT 9

In (51), *kau* is used as a plural marker. However, this is the only example of *kau* used with *ke* in my data. As seen in (49) and (50), the plural markers *po'e* and *kau* can be preceded by the article *ka/ke*. Elbert and Pukui⁽⁷⁾ pointed out that the plural marker *mau* nullifies the singularity of the k-possessives. (49)

and (50) show that the plural marker *po'e* and *kau* can also nullify the singularity of *ka/ke*.

2.5 Paucal marker

The paucal marker is *wahi* which express a small amount or tininess, as in (52).

- (52) ...he wahi keiki 'u'uku 'o Iwa.
NC-INDEF PAU child small NC Iwa
'...Iwa is a tiny little kid' SF 21

The paucal marker can be also used to express humbleness.

- (53) ...ke ha'i aku nei au iā 'oukou
ASP say DIR Po-DEM I to you
i ko'u wahi mana'o...
OBL my PAU thought
'...I'm telling you my little thought...' MA 7

Elbert and Pukui⁽⁸⁾ pointed out that *wahi* is commonly used without *mau*, and that *wahi* is included in the plural markers together with *mau*. However, I have a number of example of *wahi* used with *mau*.

- (54) ...i aku ua mau wahi kanaka nei...
say DIR AD PL PAU people this
'... these (aforementioned) people said...' SF 51
(55) ...i kāna mau wahi ukana...
OBL his PL PAU luggage
'...his little bit of luggage...' KKL 27
(56) ...he ma'alea nō ho'i kona mau wahi wāwae...
NC-INDEF skillful INT his PL PAU feet
'...his tiny feet are indeed skillful...' NK 6/13/1863:1

As seen in (54)-(56), the plural marker *mau* always precedes the paucal marker *wahi*. Therefore, I assume that the paucal marker *wahi* forms an independent word class which occurs after the plural marker.

2.6 Preposed modifiers

In Hawaiian noun phrases, postposed modifiers are prevalent. Preposed modifiers are difficult to find. There are only a few examples in my data.

- (57) 'O ka iki makua ia 'o ka ulu.
NC the short adult it NC the sphere
'The short mature one is the sphere.' SF 183
(58) ...e hapaī mua a'e 'olua i kō wahi āpulu
IMP carry before DIR you OBL your PAU worn out
wa'a no ke keiki.
canoe for the child
'... carry first your worn out canoe for the child.' PK 9

Pukui and Elbert⁽⁹⁾ also gave an example.

- (59) he iki pua mau'u
NC-INDEF small blade grass
'a small blade of grass' Pukui and Elbert (1986:97)

Another possible example is one line from the song entitled 'Ku'u tūtū' composed by Mary K. Pukui:

- (60) Aloha ku'u tūtū i ka nui lokomaikai.
beloved my grandma OBL the big kindness
'My grandma is beloved because of great kindness'
(60) can be interpreted in two ways: (i) *nui* is the preposed modifier 'great' which modifies the noun *lokomaikai* 'kindness', and (ii) *nui* is the noun 'greatness' which is modified by *lokomaikai* 'kind'. Although the given translation seems to suggest the interpretation (i), it is still controversial.

3 COMBINATION OF FUNCTIONS

3.1 Definition

Sometime, a prenucler element does not fit into one of word classes advanced in Chapter 2, but it is equivalent to the combination of two word classes. I call it COMBINATION OF FUNCTIONS. These are similar to the examples called

PORTMANTEAU MORPHEME.

3.2 Preposition + determiner

3.2.1 *he* The word *he* is the combination of the neutral case preposition 'o and the indefinite article. Since 'o is one of prepositions which can form a prepositional predicate, the word *he* can also introduce a predicate.

- (61) He manu nui kēia e like me ka 'ō'ō,..
NC-INDEF bird big this ASP like with the 'ō'ō
'This is a big bird like the 'ō'ō bird,..' NK 6/13/1863:1

Since *he* is the combination of the preposition and the indefinite article, it cannot be used with another preposition nor another determiner. However, *he* can be used with other prenucler elements which occur after determiners, such as the plural marker *mau*, as in (62), or the paucal marker *wahi*, as in (63)

- (62) He mau mea maikai nō na'e.
NC-INDEF PL thing good INT but
'But (it is) indeed good things.' KT 9
(63) He wahi manu 'u'uku kēia,..
NC-INDEF PAU bird small this
'This is a small bird,..' NK 6/13/1863:1

The word *he* cannot be preceded by another preposition. When an indefinite noun phrase is preceded by a preposition, there are three options. A definite noun phrase preceded by a preposition can be realized as: (i) Preposition + Noun phrase without a determiner (i.e., omitting *he*), (ii) Ø + Noun phrase preceded by *he* (i.e., omitting a preposition) or (iii) Preposition + Noun phrase preceded by the definite article (i.e., replacing *he* with the definite article). Options (i) and (ii) are illustrated by (64) and (65). When an indefinite noun phrase is the object of a verb, either *he* is omitted, as in (64), or the preposition *i* (oblique) is omitted, as in (65).

- (64) ...e 'imi i mea 'ai.
to look for OBL thing eat
'...to look for food.' HW 17
(65) Ua hānau 'o Malaekahana he
ASP give birth NC Malaekahana NC-INDEF
kaikamahine.
girl
'Malaekahana gave birth to a girl.' L 345

In order to coordinate two or more noun phrases, they are coordinated by *ame* 'and'. It consists of the conjunction *a* 'and' and the preposition *me* 'with'. Since *he* cannot be preceded by another preposition, *ame* cannot be used before *he*. Therefore, *he* after *ame* is replaced by the definite article *ka/ke*. This is an example of the option (iii).

- (66) ..he mau i'a he kikakapu, he
NC-INDEF PL fish NC-INDEF kikakapu NC-INDEF
kapuahili, he oliēpa ame ke kala.
kapuahili NC-INDEF oliēpa and the kala
'... (there are) some fish, a kikakapu, a kapuahili, a oliēpa and a kala.' KL 13

In (66), many varieties of fish are listed. The definite article occurs only after *ame*, while *he* occurs elsewhere.

3.2.2 *mehe* The word *mehe* '(look) like' is also equivalent to the combination of Preposition *me* + Indefinite article. Since *mehe* contains an article, it cannot be used with another article. *Mehe* is often used with a noun followed by the postnucler demonstrative *la*.

- (67) ...ua halulu mehe hekili la
ASP roar like thunder Po-DEM
'(it) was roaring like a thunder.' SF 169

Many prepositions can introduce a prepositional predicate. The word *mehe*, which is an equivalent to the combination of Preposition + Article, can also introduce a prepositional predicate.

- (68) Mehe makuakāne la 'oe no'u.
like father Po-DEM you for me
'You are like a father for me.' SF 241

In (68), *mehe makuakāne la* is a prepositional predicate and 'oe is a subject.

3.3 Determiner + plural marker

Although there is no clear example of a word which is functionally equivalent to the combination of Determiner + Plural marker, one possible candidate is the definite plural article *nā*. If *nā* is equivalent to the combination of Determiner + Plural marker, *nā* cannot be used with other plural marker. My data contains no example of *nā* used with the plural marker *mau*. It supports that the assumption *nā* is the equivalent for the combination of Determiner + Plural marker. However, Elbert and Pukui⁽¹⁰⁾ claimed that "the sequence *nā mau* is heard, although it has not been noted in writing". If *nā* can be used with *mau*, *nā* is merely a determiner.

3.4 Determiner + Nuclear noun

The word *kahi* 'the place' cannot be used with any other prenuclear elements. This *kahi* is the equivalent for the article *kalke* + a nuclear noun *wahi* 'place'. Therefore, other prenuclear elements that have to occur between the determiner and the nuclear noun do not occur before or after *kahi*. Only postnuclear elements can be used with *kahi*.

- (69) Holo aku nei lākou i kahi 'ē loa.
run DIR Po-DEM they OBL place different very
'They ran to somewhere else.' FH 116

In (69) *kahi 'ē loa* is a noun phrase. The word *kahi* is equivalent to the combination of Prenuclear element + Nuclear noun, and 'ē loa is a postnuclear element. Note that *kahi* discussed in this section is semantically and syntactically different from *kahi* discussed in 2.3.4.

4 NOUN PHRASE WITHOUT ANY PRENUCLEAR ELEMENT

Personal pronouns and locational nouns are not used with the prenuclear elements.

The plural common nouns may occur without any prenuclear element.

- (70) Huki kānaka i ka 'ōhi'a...
pull people OBL the ohia tree
'People pulled the ohia trees...' FH 133
(71) ...he mea nui wale kēia mea i
NC-INDEF thing important INT this thing OBL
kamali'i o ko mākou wahi.
children of our place
'... this is a very important thing for children of this place.' SF 165

The noun *kānaka* 'persons' in (70) is the plural form of the noun *kanaka* 'person'. The noun *kamali'i* 'children' in (71) is semantically plural. Both of these occur without any prenuclear element in (70) and (71).

Occasionally, other common nouns may occur without prenuclear elements, if it is used in the plural meaning.

- (72) ... me kama'āina o laila...
with inhabitant of there
'... with people of that place...' FH 106
(73) ... ua moe kiai o ka lua.
ASP sleep guard of the cave
'... the guards of the cave slept.' SF 177

There are also a series of nouns referring to geographic features that are often used without any prenuclear element. Those nouns include *kahaone* 'beach', *kahakai* 'beach', *kahawai* 'stream', *ka'e* 'edge', *kapa* 'boundary' and *kapawai* 'bank'.

- (74) i kahakai o Laupahoe
OBL beach of Laupahoe
'at the beach of Laupahoe' SF 153
(75) ma ka'e o ka luawai
OBL edge of the pond
'at the edge of the pond' SF 351

Those nouns may be also used with articles.

- (76) ...ua hiki lākou i ke kahakai.
ASP reach they OBL the beach
'... they arrived at the beach.' FH 142
(77) ma ke ka'e o kēlā luawai
OBL the edge of that pond
'at the edge of that pond' SF 351

Although it is not clear when the articles are used and when they are not used, the contrast between (75) and (77) is suggestive. (77) is more specific than (75), since (77) refers to the edge of that (specific) pond. It seems the article *ke* is used when the referent of the noun is more specific or more definite.

5 SEQUENTIAL ORDER

The sequential order among prenuclear elements and a nuclear noun can be schematized as:

- (78) ± preposition ± determiner ± plural marker ± paucal marker ± preposed modifier + nuclear noun

This ordering, excluding the preposed modifier, is illustrated by (79).

- (79) ...e lawe mai i kana mau wahi ukana.
ASP bring DIR OBL his PL PAU luggage
'...and brought his small luggage.' L 367

In (79), *kāna* is a determiner, *mau* is a plural marker and *wahi* is a paucal marker. Although the preposed modifier is rarely seen, it sometimes occurs after the paucal marker.

- (80) ... e hapai mua a'e 'olua i ko wahi 'āpulu
IMP carry before DIR you OBL your PAU worn out
wa'a no ke keiki
canoe for the child
'... carry first your worn out canoe for the child.' PK 9

In (80), 'āpulu is a preposed modifier, which comes after a paucal marker *wahi*.

6. CONCLUSION

In the present paper, I showed a new version of the inventory of prenuclear elements together with the sequential order among them, which produces less exception than those advanced in previous works. I also advanced the notion COMBINATION OF FUNCTIONS, which makes it possible to take care of words which do not fit into a single word class.

LIST OF ABBREVIATIONS

Grammatical Terms

ACC:	accusative marker
AD:	anaphoric demonstrative
AP:	anaphoric particle
ART/PL:	plural article
ASP:	aspect marker
DIR:	directional
GER:	gerund marker
IMP:	imperative marker
INDEF:	indefinite article
INT:	intensifier
k-POS:	k-possessive
NC:	neutral case marker
OBL:	oblique marker
PAS:	passive marker

PAU: paucal marker
 PL: plural marker
 Po-DEM: postnuclear demonstrative
 VOC: vocative marker

Hawaiian texts

AK: Ao Kiko
 FH: Folktales of Hawaii
 HW: O na Holoholona Wawae Eha
 KKL: Ke Kaao o Laieikawai
 KL: Moolelo Hawaii no Kalapana
 KT: Kepelino's traditions of Hawaii
 L: The Hawaiian Romance of Laieikawai
 LH: Ka Lama Hawaii
 MA: Ka Manao o na Alii
 Malo: Ka moolelo Hawaii
 MK: Ka Moolelo o Kamapuaa
 NK: Nupepa Kuokoa
 PK: Pakaa ame KuaPakaa
 SF: Selection from Fornander

- (3) Andrews, L., Grammar of the Hawaiian language, Mission press, (1854).
- (4) Alexander, W. D., A short synopsis of the most essential points in Hawaiian grammar, Charles E. Tuttle Co., (1968).
- (5) Elbert, Samuel E. and Pukui, Mary K., Hawaiian Grammar, University of Hawaii press, (1979).
- (6) Elbert, Samuel E. and Pukui, Mary K., Hawaiian Grammar, University of Hawaii press, (1979).
- (7) Elbert, Samuel E. and Pukui, Mary K., Hawaiian Grammar, University of Hawaii press, (1979).
- (8) Elbert, Samuel E. and Pukui, Mary K., Hawaiian Grammar, University of Hawaii press, (1979).
- (9) Pukui, Mary K. and Elbert, Samuel E., Hawaiian dictionary, University of Hawaii press, (1986).
- (10) Elbert, Samuel E. and Pukui, Mary K., Hawaiian Grammar, University of Hawaii press, (1979).

REFERENCES

- (1) Elbert, Samuel E. and Pukui, Mary K., Hawaiian Grammar, University of Hawaii press, (1979).
- (2) Hale, H., Ethnography and Philology, The Gregg Press, (1968).

ハワイ語名詞句における前中核要素

塩谷 亨

概要

ハワイ語の名詞句は前から順番に前中核要素、中核名詞、後中核要素の三つに分類できる。本稿では前中核要素の構造についての記述を目的とする。名詞句内の前中核要素の位置に現れる語類は、前置詞、限定辞、複数辞、指小辞、前置修飾語である。これらの語類及び中核名詞を併せた構造は{前置詞±限定辞±複数辞±指小辞±前置修飾語+中核名詞}のように示される。本稿ではまた、上記の語類の一つにうまくおさまらず、二つの語類の機能を合わせ持つ語の例も示す。

キーワード： ハワイ語、名詞句、前中核要素

共通講座

フランス語における中性代名詞 クリティック “y”, “en” について

藤田 健*

Neuter Clitics “y”, “en” in French

Takeshi FUJITA

(原稿受付日 平成10年 5 月 8 日 論文受理日 平成10年 8 月31日)

Abstract

French neuter clitics, “y” and “en”, are used as pro-forms of prepositional phrases. When they appear in a causative construction, they demonstrate a complex pattern of grammatical characteristics. The aim of this article is to make clear syntactic properties of “y” and “en” as pro-forms of prepositional phrases in terms of a framework of the Generative Grammar, Minimalist Program in Chomsky(1995). I argue that the licensing condition of the neuter clitics is that they must be incorporated into the verb complex in overt syntax without being Case-checked, unlike object clitics which must be Case-checked. This condition and the analysis of the causative construction in French presented in this article enable us to explain the intricate distribution of “y” and “en” in a causative construction straightforwardly without any special movement rules.

Key words : French, neuter clitic, causative construction, Generative Grammar

1. はじめに

フランス語には、動詞に音韻的に依存する形で生起する代名詞クリティックが存在する。この代名詞クリティックは、動詞の直接目的語及び間接目的語のように項として機能するクリティックと、それ以外の要素として機能する中性代名詞クリティックに大別することができる。本稿は、使役構文という環境における分布を観察することによって、Chomsky(1995)⁽¹⁾において提唱されている、生成文法の最新理論である最小主義理論(Minimalist Program)に基づき、中性代名詞クリティック“y”及び“en”の統語的性質を明らかにすることが目的である。

中性代名詞クリティックには、“le”、“en”、“y”の三つが

あるが、“en”と“y”はいずれも特定の前置詞句を受けるという共通性をもっている。この二つの中性代名詞クリティックは、動詞“faire”を用いる、倒置を含む使役構文において、目的語代名詞クリティックと異なる分布を示す。以下では、まず中性代名詞クリティック“y”、“en”の機能を概観し、使役構文における分布を観察する。次に、本稿の使役構文に対する分析を提示する。最後に、中性代名詞“y”、“en”の統語的特性を考察する。

2. 前置詞句を受ける中性代名詞 クリティック“en”、“y”

中性代名詞クリティック“en”と“y”は、一般に副詞句を受けるという点で、目的語代名詞と機能を異にする。この二つの中性代名詞クリティックに共通するのは、特定の前置詞句を受けると機能をもつということである。前置詞句は、

*共通講座

目的語や補語に比べ、動詞との意味的關係が希薄であると考えられる要素である。実際、統語的には、動詞から意味役割を受ける要素であっても、動詞句において素性照合は行われない。このことから、前置詞句を受けるクリティックがどのような認可条件を持つのが非常に興味深いところである。なお、“en”にはこの他に、名詞句の一部を受ける用法や、不定の名詞句を受ける用法があるが、本稿ではこれらの用法に関しては現象の観察にとどめ、詳細な検討は別稿に譲ることとする。

2. 1. “en”と“y”の機能

“en”は、基本的には前置詞“de”によって導かれる前置詞句を受ける。(2)は、(1)の文における前置詞句を“en”で受けた例である。

(1) a. J'ai parlé de mon ouvrage.

I spoke of my work

“私は自分の仕事のことを話した。”

b. Il est content de son succès.

he is pleased of his success

“彼は自分の成功を喜んでいる。”

c. Je vous remercie beaucoup de votre aimable

I you thank much of your kind

invitation.

invitation

“ご親切にご招待いただき、大変感謝しております。”

(2) a. J'en ai parlé.

I of-it spoke

b. Il en est content.

he of-it is pleased

c. Je vous en remercie beaucoup.

I you of-it thank much

“y”は、基本的に前置詞“à”によって導かれる前置詞句を受けるが、“à”以外の前置詞によって導かれる、場所を表す前置詞句も受ける。(4)は、(3)の文における前置詞句を受けた例である。

(3) a. Il manque trop souvent à son devoir.

he disobeys too often to his duty

“彼はあまりにも義務を怠りすぎる。”

b. Vous vous intéressez à Paul?

you you interest to

“あなたはポールに関心がありますか。”

c. Elle habite en France.

she lives in France

“彼女はフランスに住んでいる。”

(4) a. Il y manque trop souvent.

he to-it disobeys too often

b. Vous vous y intéressez?

you you to-it interest

c. Elle y habite.

she there lives

このように、「前置詞+名詞句」全体を受けるという点で、通常の代名詞とは大きく異なる。また、特定の前置詞句を受けるという意味において、英語における副詞句を受ける“there”とも機能を異にする。

2. 2. 動詞“faire”を用いる使役構文

フランス語の使役構文は、英語と同様、不定詞補文を含む。ただし、英語と異なり、2種類の語順が存在する。

一つは、英語における例外的格標示構文と同じように、主文の動詞に被使役者名詞句（以下 causee）、不定詞の順で後続するタイプである。これは、動詞“laisser”を用いる使役構文である。この語順は使役構文の他に、いわゆる知覚動詞構文にも見られる。このタイプの場合、causee は前置詞を伴わない。

(5) a. Il laissera son ami manger les gâteaux.

he will-let his friend eat the cakes

“彼は友人にケーキを食べさせるだろう。”

b. Il a laissé son ami partir.

he let his friend leave

“彼は友人に出発させた。”

もう一つのタイプは、causee が補文の動詞に後続し、補文の動詞の種類によって causee のマーキングが異なるというものである。これは動詞“faire”を用いる場合には義務的な語順であり、前述の動詞“laisser”や知覚動詞を用いた構文でも随意的に見られる語順である。このタイプの場合、補文の動詞の種類と causee の間に以下のような関係が見出される。補文の動詞が自動詞の場合、(6a)のように causee は動詞に後続しなければならない、(6b)のように動詞に先行する語順は不可能である。この場合、補文に含まれる前置詞句は causee に後続しなければならない、(6c)のように causee が前置詞句に後続する文は非文である。

- (6) a. Jean a fait sortir Marie de sa chambre.
made leave of her room
“ジャンはマリを部屋から出させた。”
b. *Jean a fait Marie sortir de sa chambre.
c. *Jean a fait sortir de sa chambre Marie.

補文の動詞が他動詞である場合、(7a)のように causee は前置詞“à/par”を伴って生起し、動詞句に後続しなければならない。(7b,c,d)のように前置詞を伴わずに生起している文は非文である。

- (7) a. Jean a fait manger ce gâteau à/par Pierre.
made eat this cake to/by
“ジャンはピエールにこのケーキを食べさせた。”
b. *Jean a fait Pierre manger ce gâteau.
c. *Jean a fait manger Pierre ce gâteau.
d. *Jean a fait manger ce gâteau Pierre.

このように、“faire”を用いる使役構文は、補文の種類によって項となる名詞句の格が替わるという、統語的に特殊な構文であると言える。従って、動詞に依存する形で生起する代名詞クリティックの特性を観察する上で、極めて興味深い環境を提供するのである。

2. 3. 使役構文における“y”、“en”の分布

では、動詞“faire”を用いる使役構文において、中性代名詞クリティック“y”, “en”が補文内の要素として生起した場合、どのような分布を示すだろうか。次の例に示されるように、主文の動詞、補文の動詞いずれにもクリティック化が可能となる。以下の例は、Rouveret and Vergnaud(1980)^②からの引用である。

- (8) a. On essaiera de faire en parler ton ami.
one will-try of(to) make of-it speak your friend
“皆は君の友達にそのことを話させようとするだろう。”
b. Elle fera en sortir Jean.
she will-make of-it go-out
“彼女はジャンをそこから出させるだろう。”
c. Marie a fait y acheter ces livres à
made there buy these books to
Jean.
“マリはジャンにそれらの本をそこで買わせた。”
d. Marie a fait y aller Jean.
made there go
“マリはジャンをそこに行かせた。”

- e. Cela fait y penser tout le monde.
that makes to-it think everybody
“それによって、皆そのことを考えている。”

- (9) a. On essaiera d'en faire parler ton ami.
of-it

- b. Elle en fera sortir Jean.
of-it

- c. Marie y a fait acheter ces livres à Jean.
there

- d. Cela y fera aller Jean.
there

- e. Cela y fait penser tout le monde.
to-it

ただし、一部の動詞の項となっている前置詞句がクリティック化される場合には、主文にクリティック化されている文は非文となる。

- (10) a. *Jean y fera comparer cette sonatine à
to-it will-make compare this sonatina to
Paul.

“ジャンはポールにこのソナチネをそれと比較させるだろう。”

- b. *Jean y fera mettre ce livre à Pierre.
there will-make put this book to

“ジャンはピエールにこの本をそこに置かせるだろう。”

- c. *Jean en fera déduire cette conclusion à
of-it will-make deduce this conclusion to
Lucie.

“ジャンはリュシーにそこからこの結論を出させるだろう。”

(Rouveret and Vergnaud(1980))

このように、前置詞句を受ける中性クリティックは、通常主文の動詞以外にクリティック化が不可能な目的語クリティックとは異なり、極めて複雑な分布を示す。これは、これらのクリティックが、それ自体で、目的語クリティックとは異なった統語的特性を持っていることを示唆している。

3. 従来の分析

前置詞句を受ける中性代名詞クリティックに関して、最も詳細な分析を提示しているのは、Rouveret and Vergnaud(1980)である。彼らは、項となっているクリテ

イックと項となっていないクリティックのふるまいの違いに注目し、項となっている前置詞句は補文の動詞から主題指標(thematic index)を受け取ると主張する。

(11) Jean y a comparé¹ ce livre Prep¹ NP

上の図で、“Prep NP”は“y”の痕跡を表し、“1”が主題指標を表す。この主題指標が前置詞句に与えられた場合、主語がその文を不透明な領域にする要素として機能する。従って、(11)が使役構文の補文として生じた場合、補文が不透明な領域となり、主文との関係づけが不可能になる。このため、以下の(12)(=(10))の文が非文となると説明している。

- (12) a. *Jean y fera comparer cette sonatine à
to-it will-make compare this sonatina to
Paul.
b. *Jean y fera mettre ce livre à Pierre.
there will-make put this book to
c. *Jean en fera déduire cette conclusion à
of-it will-make deduce this conclusion to
Lucie.

確かに、前置詞句を受けるクリティックのみを観察した場合には、この分析は明解であるように思われる。しかし、主題指標と透明性との関係についてあまり議論していないという点で、理論的には不透明な部分が残る。更に、経験的に問題となるのは、目的語クリティックのふるまいとの整合性である。補文の動詞の項である直接目的語は、主文の動詞にしかクリティック化できない。

- (13) a. Pierre les fera acheter à Jean.
them will-make buy to
“ピエールはジャンにそれらを買わせるだろう。”
b. *Pierre fera les acheter à Jean.
them

この場合には、動詞句として、目的語が動詞と共に移動しなければならないので、主文の動詞にクリティック化しなければならないとしている。この分析は、項でありながら名詞句と前置詞句が異なるふるまいを示すという事実に対して、それぞれの現象に合わせて別な仮定をし、両者の関係を明確に示しえないという点で、クリティック全体を見渡す観点からは妥当性が低いと言わざるを得ない。以下では、使役構文の構造を考察し、それに基づいた分析を進めていく。

4. 使役構文の構造

従来、フランス語の使役構文に関する分析は、Bailard(1982)⁽³⁾, Burzio(1986)⁽⁴⁾, Goodall(1986)⁽⁵⁾, Guasti(1996)⁽⁶⁾, 同(1997)⁽⁷⁾, Jaeggli(1982)⁽⁸⁾, Kayne(1975)⁽⁹⁾, Reed(1990)⁽¹⁰⁾, Rosen(1989)⁽¹¹⁾, Zubizarreta(1985)⁽¹²⁾, 同(1986)⁽¹³⁾等、数多く存在するが、いずれも不自然な仮定を含む、あるいは包括的な現象の説明が困難である等の問題点を抱えており、完全なものとは言えない。本稿では、使役構文の構造について、次のように仮定する。

(14) 倒置を含む使役構文の補文は TP を含まない。

(15) 倒置を含む使役構文において、動詞“faire”と補文の動詞は overt syntax において X⁰ 移動による統語的複合動詞を形成する。

ここで、TP とは時制要素 T(ense)を主要部(head)とする句であり、overt syntax とは意味解釈部門と音声部門に分かれる前の段階の統語的派生レベルを指している。この仮定に基づくと、動詞“faire”による使役構文の場合、“faire”の語彙的特性として、補文の動詞と統語的に複合動詞を形成しなければならないため、結果として補文の主語である causee と補文の動詞が倒置することになる。この考え方をとれば、後に述べるように、補文の動詞が他動詞である場合に見られる causee と補文動詞句との倒置や causee のマーキングも自然に説明される。以下で、補文の動詞が自動詞の場合と他動詞の場合に分けて、具体的な構造を提示する。

4. 1. 補文の動詞が自動詞の場合

倒置を含む使役構文では(14)の条件、すなわち補文の構造に関する特性により補文が VP となるので、補文の動詞が前置詞句を含む自動詞を例にとると、基底の構造は(16)のようになる。

- (16) [_{TP} T [_{VP} NP [FAIRE [_{VP} [NP [V PP]]]]]]

(15)の条件により、補文の動詞は主文の動詞“faire”と統語的に複合動詞を形成する。Pollock(1989)⁽¹⁴⁾が主張するように、フランス語においては時制要素の素性が強いので、主語名詞句と時制を持つ定動詞（この場合は“faire”）は、overt syntax においてそれぞれ TP 指定部と T に移動しなければならない。これは、動詞の持つ素性が名詞句の持つ素性を照合することによってその存在を認可する格照合

というプロセスを経なければならないからである。この際、動詞 “faire” は、Roberts(1991)⁽¹⁵⁾ が提案している excorporation という移動によって、複合動詞から分離し単独で移動すると仮定する。この仮定は、“faire”と補文の動詞に副詞句が介在できるという事実によって支持される。

- (17) Ils la feront sans aucun doute pleurer.
 they her will-make without any doubt cry
 “彼らは間違いなく彼女を泣かせるだろう。”

overt syntax における派生は以下になる。

- (18) [TP NP_i FAIRE_{Ek}-T [VP t_i [V' t_k-V₁ [VP [NP [V' t_j PP]

overt syntax においてこのような派生がなされた後、意味解釈部門である LF において、対格でマークされる補文の主語 NP が格照合を受けねばならない。そのために、補文の主語 NP は主文の VP 指定部に移動する。このようにして、最終的に得られる統語表示は(19)に示される通りである。

- (19) [TP NP_i [FAIRE_{Ek}-T [VP NP_j [t_i [t_k-V₁ [VP [t_j [t_i PP]]]]]]]

それぞれの名詞句の移動は、指定部を飛び越えていない。主文の VP に、NP_jの移動先と主語の痕跡 t_i の位置という二つの指定部が存在するが、この場合、どちらも同じ範疇に属するため、同じ領域に含まれる。従って、t_j から t_i までと NP_j までの近接性は同一となり、移動が満たさねばならない一般原理である、最小連結条件(MLC)の違反にはならない。従って、(19)は適切な派生となる。このことから、(18)の overt syntax に対応する(20)(=6a))の文が文法的であることが説明される。

- (20) Jean a fait sortir Marie de sa chambre.
 made leave of her room
 “ジャンはマリを部屋から出させた。”

本稿の構造を仮定すれば、補文の動詞と causee の倒置が複合動詞形成のための動詞主要部の移動によって生ずる結果であると説明される。余分な移動規則を一切必要とせず、簡潔に説明される。

4. 2. 補文の動詞が他動詞の場合

次に、使役構文において他動詞補文が生起する場合、どのような構造となるかを考察する。他動詞補文の場合に問題となるのは、causee が2種類の前置詞、すなわち “à” もしくは “par” によってマークされるという点である。自動詞補文の場合には causee は対格標示が可能であったが、他動詞補文の場合には不可能である。本稿では、この理由は、補文の動詞が “faire” と統語的複合動詞を形成することによって、自身の格照合能力が失われ、補文の目的語の格照合が不可能となるためであると考えられる。そのため、causee が補文の目的語のいずれかが動詞による対格照合以外の方法で認可されねばならない。

本稿では、二つの異なった派生が存在し、そのために2種類の causee のマーキングが存在することを主張する。一つは、Larson(1988)⁽¹⁶⁾ において提案されている Argument Demotion がなされた補文の構造となると考えたい。Argument Demotion とは、ある要素、例えば動詞によって θ 役割を与えられる項を、付加詞として生起するよう降格する操作を言う。英語の受動文において生起する前置詞 “by” によってマークされる動作主が典型的な例である。Argument Demotion は(21)のように定義される。

(21) Argument Demotion

If α is a θ -role assigned by X_i, then α may be assigned to an adjunct of X_i.

この操作が行われると、補文の主語は PP 内に生起するので VP 指定部で格照合を受ける必要がない。この操作が適用された場合の使役構文の基底構造は(22)のように表される。

- (22) [TP [T [VP NP [FAIRE [VP [V NP] [par NP]]]]]

この構造においては、LF で VP 指定部で格照合を受けるのは、補文の目的語 NP のみということになる。Argument Demotion を受けた文において、フランス語では、動作主を表す名詞句は一般に前置詞 “par” によってマークされる。これは、次に挙げる受動文において典型的に観察される。

- (23) Marie est invité par Jean.

is invited by

“マリはジャンに招待されている。”

従って、使役構文の場合にも前置詞 “par” が用いられるのは何ら不自然ではない。

もう一つの異なる派生は、動詞 “faire” のもつ特性によって許されるものである。本稿では、動詞 “faire” には、通常

の対格名詞句を格照合できるものに加えて、対格名詞句の他に与格名詞句の照合も可能なものもあると考える。そして、与格名詞句の照合も可能な“faire”は、Kitagawa(1994)⁽¹⁷⁾が二重目的語をとる動詞に関して提案している VP-shell 構造をとっていると考えたい。VP-shell 構造とは、動詞は一つであるが、動詞句の構造としては二つの句が重なっている構造を指す。この場合、上の動詞は音韻的に空の動詞 *e* となる。本稿では便宜上、VP-shell の上の動詞句を *vP*、下の動詞句を *VP* と表記することにする。

この VP-shell の特徴は、一つの動詞でありながら、それぞれの動詞句が独自の機能を持つという点である。従って、それぞれの動詞句が別の名詞句の格照合をすることが可能となる。ここで、与格名詞句が VP-shell の上の *vP* で、対格名詞句が VP-shell の下の *VP* でそれぞれ格照合を受けるとしよう。すると、補文の主語名詞句は空の動詞 *e* の *vP* で、目的語名詞句は“faire”の *VP* でそれぞれ照合を受けることになる。これを表すと、(24)のようになる。

- (24) [TP NP_i [FAIRE_l-T [_{vP} [t_i [_{VP} NP_k [t_i [t_i-V_m [_{VP} t_j [t_m t_k]]]]]] [à NP_j]]]]

この派生において、直接目的語名詞句の移動は MLC を満たしているため、何ら問題なく文法的なのである。

以上のように考えれば、他動詞補文の場合に *causee* が自動詞補文場合と異なるマーキングで現われる理由が、一方は Argument Demotion、もう一方は VP-shell 構造という、それぞれ他の構文にも適用される一般的な操作もしくは構造によって簡潔に説明される。この場合にも、余分な移動規則は全く不要となるのである。

5. 中性代名詞クリティック “y”、“en”の統語特性

次に、本稿の中心的なテーマである中性代名詞クリティックの統語的特性を、使役構文における分布を基に考察していく。既に述べたように、前置詞句を受ける中性代名詞クリティックは目的語代名詞クリティックと異なるふるまいを示すが、前置詞句と目的語名詞句が根本的に異なるのは、名詞句が動詞によって素性照合されねばならないのに対し、前置詞句はその必要がないということである。これは、動詞句や副詞句等が照合を受ける必要がないのと全く同じである。つまり、前置詞という特定の機能を担う語が主要部であるため、それ自体で文における機能が規定され、他の要素に依存する必要がないのである。従って、動詞との照合という形で認可する必要がないということに

なる。

この前置詞句自体が持っている特性が、その代用形である中性代名詞クリティックにも継承されと考えてみよう。すると、前置詞を受ける中性代名詞クリティックの場合にも、格照合が必要ないということになる。本稿では、中性代名詞“en”と“y”が目的語クリティックとふるまいを異にするのは、まさにこの違いに起因すると考える。そこで、“en”と“y”の統語的特性としての認可条件を次のように仮定する。

- (25) 前置詞を受ける中性代名詞クリティック“en”、“y”は、動詞複合体に付加されねばならないが、素性照合は受けない。

動詞複合体への付加の条件は、Kayne(1991)⁽¹⁸⁾におけるクリティック一般に関する条件と基本的に同一である。また、クリティックの付加は、Baker(1988)⁽¹⁹⁾において主張されている主要部移動である。このように考えれば、(26)(=8))のように、“en”や“y”が使役構文の補文の動詞にクリティック化できるのはごく自然に説明される。

- (26) a. On essaiera de faire en parler ton ami.
one will-try of(to) make of-it speak your friend
b. Elle fera en sortir Jean.
she will-make of-it go-out
c. Marie a fait y acheter ces livres à
made there buy these books to
Jean.
d. Marie a fait y aller Jean.
made there go
e. Cela fait y penser tout le monde.
that makes to-it think everybody

前置詞句の構造的な位置は、Chomsky(1995)に従って、V と姉妹関係にあると考える。すると、例えば(26b)の文の基底構造は(27)のようになる。

- (27) [TP T [_{VP} NP [FAIRE [_{VP} NP [V PP]]]]

この構造で、PP が中性代名詞クリティックに対応する。中性代名詞クリティックはクリティックとしての性質上、他のクリティック同様、動詞複合体に付加しなければならない。最終的な LF での構造は次のようになる。“cl”は中性代名詞クリティックを表わす。

- (28) [TP NP_i [FAIRE]_i-T [VP NP_j [t_i [cl_k-t_i-V_m [VP t_j [t_m t_k]]]]]]

中性代名詞クリティックがクリティック化する移動先として最も近い動詞複合体は、補文の動詞となる。従って、補文の動詞への移動は MLC を満たす。また、(25)の条件により、中性代名詞クリティックは照合を受ける必要がないので、主文の動詞句の指定部に移動する理由がない。このため、この派生は適格となるのである。

では、(29)=(9)のように“en”や“y”が主文の動詞にもクリティック化が可能であるのはなぜであろうか。

- (29) a. On essaiera d'en faire parler ton ami.

of-it

- b. Elle en fera sortir Jean.

of-it

- c. Marie y a fait acheter ces livres à Jean.

there

- d. Cela y fera aller Jean.

there

- e. Cela y fait penser tout le monde.

to-it

もし(27)のような基底構造から、直接クリティックの移動が行われるのであれば、補文の動詞句内の位置から主文の動詞への移動は不適格となるはずである。補文の動詞がクリティック化できる要素として存在するため、主文の動詞への移動は MLC の違反となるからである。では、(29)はどのような派生によって生成されるのであろうか。いくつかの可能性が考えられるが、本稿では、一つの可能性として、項でない前置詞句が基底構造において補文の動詞句に付加している形で生成が可能であると考ええる。この構造は、(30)に示される。

- (30) [TP T [VP NP [FAIRE [VP [NP [...V...] PP]]]]

この構造では、PP から最も近い動詞複合体は主文の動詞ということになる。前置詞句を受ける中性代名詞クリティックは格照合を受ける必要がないので、クリティック化のために動詞複合体に移動するだけで認可条件が満たされる。LF での構造を次に示す。

- (31) [TP NP_i [cl_k-FAIRE]_i-T [VP NP_j [t_i [t_i-V_m [VP [t_j [...t_m...] t_k]]]]]]

この場合、中性代名詞クリティックが主文の動詞“faire”に

付加した後、“faire”とともに T に移動する派生も可能となる。従って、(29)の文も適格な派生をもつことになり、文法的なのである。

ここで予想されるのは、(30)のように動詞句に付加する形で生成される構造が許されない前置詞句、すなわち補文の動詞と結びつきが強い前置詞句を受ける“en”や“y”は、このように主文の動詞へのクリティック化する語順が非文となるということである。実際、項である前置詞句を受けている(32)=(10))がその例に当たる。

- (32) a. *Jean y fera comparer cette sonatine à
to-it will-make compare this sonatina to
Paul.

- b. *Jean y fera mettre ce livre à Pierre.
there will-make put this book to

- c. *Jean en fera déduire cette conclusion à
of-it will-make deduce this conclusion to
Lucie.

これらの例では、それぞれ中性代名詞クリティックが補文の動詞の項として機能している。従って、これらの文の基底構造としては、前置詞句が補文の動詞と姉妹関係にある(27)のみが許され、補文の動詞句の上位の位置に付加している(30)が許されないために、(32)が非文となると考えることができる。ここでの分析は、いくつか考えられる可能性の一つであり、更に検討する必要があるものである。しかし、中性代名詞クリティックが動詞句内で素性照合を受ける必要がないという統語的特性を仮定し、適切な動詞句の構造を設定することによって、使役構文における中性代名詞クリティックの、目的語クリティックとは明らかに異なる複雑な分布が、この構文に特定の移動規則等を仮定することなく簡潔に説明されることが示された。次の節では、今後考察を進めていく上で考慮に入れるべき例を挙げる。

6. 他のクリティックとの共起 及び“en”の他の用法

本稿では、前置詞句の代用表現としての中性代名詞クリティックに対する分析を提示したが、他のクリティックと共起する場合、あるいは“en”が前置詞句以外の要素を受けする場合にも複雑な分布が生じる。本節では、これらの現象を観察し、今後の課題とする。

一つ目の現象は、項として機能する中性クリティックに関してであるが、項としての中性クリティックは主文の動詞にクリティック化できないと述べた。しかし、これには例外が存在し、もし補文の主語がクリティック化されれば

中性クリティックも主文の主語にクリティック化が可能となる。

- (33) a. Jean leur y fera comparer cette
 them to-it will-make compare this
 sonatine.
 sonatina
 “ジャンは彼らにこのソナチネをそれと比較させるだろう。”
- b. Jean leur y fera mettre ce livre.
 them there will-make put this book
 “ジャンは彼らにこの本をそこに置かせるだろう。”
- c. Jean leur en fera déduire cette
 them of-it will-make deduce this
 conclusion.
 conclusion
 “ジャンは彼らにそこからこの結論を出させるだろう。”

(Rouveret and Vergnaud(1980))

つまり、補文の主語のクリティック化が、補文の動詞の項である中性クリティックのクリティック化の領域を広げるのである。この現象を考える場合には、補文の主語としてのクリティックの認可条件と中性クリティックの認可条件との関係を明確にしなければならない。

補文の他動詞の主語である *causee* が代名詞クリティックとして生起する場合には与格形クリティックとなるので、対応する名詞句は前置詞“à”でマークされるものと考えられる。与格形クリティックは“[par]+名詞句”には対応しないからである。

4 節で述べたように、与格形クリティックは主文の動詞句において格照合を受ける。従って、*causee* が主文の動詞にクリティック化するのは予想される通りである。(33)の現象は、*causee* としての格照合が、何らかの形で補文の項としての中性代名詞クリティックに影響を与える可能性を示唆している。一つの可能性として、次のように考えることができよう。中性代名詞クリティックの認可条件は、動詞複合体に付加されるだけで満たされる。ここで、中性代名詞クリティック自身が直接動詞に移動しなくても、結果的に動詞複合体に付加していればよいとする。中性代名詞クリティック自身は、補文の主語である *causee* に移動する。この移動は MLC を満たす。次に、*causee* は主文の動詞句で格照合を受けた後、中性代名詞クリティックを伴ったまま、最終的に主文の動詞複合体に付加することになる。すると、結果的に中性代名詞クリティックも主文の動詞に付加され、認可条件を満たすことになる。この考え方

は一つの可能性に過ぎず、今後更に検証する必要があるが、中性代名詞クリティックの特殊性を示唆するものと言えるよう。

二つ目の現象は、“en”がもつ、前置詞句を受ける以外の用法、すなわち名詞句の一部もしくは全部を受けるという用法である。この用法で特に注目すべきは、*causee* である与格名詞句の一部を“en”で受けるのは不可能であるということである。(34)は *causee* の一部を“en”で受けたものである。

- (34) a. *Le capitaine en a fait boire ce vin à
 the captain of-them made drink that wine to
 trois.
 three
 “艦長はその中の3人にそのワインを飲ませた。”
- b. *Elle a fait s'en acheter des chaussures
 she made SE of-them buy some shoes
 à trois.
 to three
 “彼女はその中の3人に自分自身の靴を買わせた。”
- (Kayne(1975))

使役構文でも、(35)のように対格で標示される *causee* や補文の目的語の場合には、その一部を“en”で受けることが可能である。

- (35) a. Le capitaine en a fait ramper trois dans
 the captain of-them made crawl three in
 la boue.
 the mud
 “艦長はその中の3人に泥の中を這わせた。”
- b. Sa mère est arrivée à lui en faire
 her mother managed to him of-them make
 s'acheter une paire.
 self buy a pair
 “彼の母はなんとか彼に自分用にそれを一足買わせた。”
- (Kayne(1975))

“en”の名詞句の一部を受ける用法に関しては、従来 Pollock(1986)⁽²⁰⁾や Elliott(1986)⁽²¹⁾等、いくつかの議論があるが、いずれも現在の理論的枠組みからは問題点が存在する。名詞句の一部及び全部を受ける“en”の認可条件は、前置詞句を受ける場合と異なる可能性が大きく、簡単に結論づけることはできないが、一つの可能性として、与格形で生起する *causee* は、対格形で生起する *causee* とは異なり、一種の島を形成することが考えられる。与格形は、名

詞句の場合には前置詞“à”でマークされることから、前置詞を伴わない対格形の名詞句と統語的に異なる特性を持つことも不自然なことではない。この島の形成が何に起因するか等の問題は今後の課題としたい。

7. まとめ

本稿では、中性代名詞クリティックのうち、前置詞句を受ける“en”、“y”の統語的特性を、動詞“faire”を用いる使役構文における分布を基に、考察した。本稿が提案する、統語的特性としての認可条件は次のものである。

- (36) 前置詞を受ける中性代名詞クリティック“en”、“y”は、動詞複合体に付加されねばならないが、素性照合は受けない。

重要なのは、中性代名詞クリティックは、目的語クリティックと異なり、動詞句で格照合を受けないので、使役構文における分布が目的語クリティックと異なるということである。

本稿の議論は、今後の中性代名詞クリティックの研究における初期段階であり、中性クリティック全体の統語的特徴を詳細に議論したものではない。あくまでも、中性代名詞クリティックの特定の用法に関する考察であり、一部触れた“en”の不定の名詞句や名詞句の一部を受ける用法に対する考察は、扱っていない。中性代名詞クリティックは、目的語を受けるクリティックと異なり、かなり動詞の語彙的性質と連動する部分があるので、同じ構文でも動詞の選択によって文法性が変わる場合が多い。これは、中性代名詞クリティックそのものがかなり広い用法を含んでいることにも起因すると思われる。従来の研究でも、中性代名詞の特定の用法に関する分析は多いが、包括的に分析しているものはそれほど多いとは言えず、また十分説得的な議論は、まだ提示されていないというのが現状である。このような状況を踏まえ、今後中性代名詞クリティックの包括的研究が大きな課題となろう。

文献

- (1) Chomsky, Noam (1995) *The Minimalist Program*, The MIT Press, Cambridge.
- (2) Rouveret, Alain and Jean-Roger Vergnaud (1980) “Specifying Reference to the Subject: French Causatives and Conditions on Representations,” *Linguistic Inquiry* 11, 97-202.
- (3) Bailard, Joelle (1982) “The Interaction of Semantic

- and Syntactic Functions and French Clitic Case Marking in Causative Sentences,” In Paul J. Hopper and Sandra A. Thompson (eds.), *Syntax and Semantics* 15, Academic Press, San Diego.
- (4) Burzio, Luigi (1986) *Italian Syntax—A Government-Binding Approach—*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- (5) Goodall, Grant (1986) “Case, Clitics, and Lexical NP's in Romance Causatives,” In Carol Neidle and Rafael A. Nunez Cedeno (eds.), *Studies in Romance Languages* Foris Publications, Dordrecht.
- (6) Guasti, Maria Teresa (1996) “Semantic Restrictions in Romance Causatives and the Incorporation Approach,” *Linguistic Inquiry* 27, 294-313.
- (7) Guasti, Maria Teresa (1997) “Romance Causatives,” In Liliane Haegeman (ed.), *The New Comparative Syntax*, Longman, New York.
- (8) Jaeggli, Osvaldo (1982) *Topics in Romance Syntax*, Foris Publication, Dordrecht.
- (9) Kayne, Richard S. (1975) *French Syntax*, The MIT Press, Cambridge.
- (10) Reed, Lisa (1990) “Adjunction, X0 Movement, and Verbal Government Chains in French Causatives,” In T. green and S.Uziel (eds.), *MIT Workig Papers in Linguistics Vol.12*, 161-176.
- (11) Rosen, Sara Thomas (1989) “The Argument Structure and Phrasal Configuration of Romance Causatives,” In *MIT Working Papers in Linguistics Vol.11*, 212-227.
- (12) Zubizarreta, Maria Luisa (1985) “The Relation between Morphophonology and Morphosyntax: The Case of Romance Causatives,” *Linguistic Inquiry* 16, 247-289.
- (13) Zubizarreta, Maria Luisa (1986) “Le Statut Morpho-Syntaxique des Verbes Causatifs dans les Langues Romanes,” In Ronat & Couquaux (eds.), *La Grammaire Modulaire*, éd Minuit, Paris.
- (14) Pollock, Jean-Yves (1989) “Verb Movement, Universal Grammar, and the Structure of IP,” *Linguistic Inquiry* 20, 365-424.
- (15) Roberts, Ian (1991) “Excorporation and Minimality,” *Linguistic Inquiry* 22, 209-218.
- (16) Larson, Richard K. (1988) “On the Double Object Construction,” *Linguistic Inquiry* 19, 335-391.
- (17) Kitagawa, Yoshihisa (1994) “Shells, Yolks, and Scrambled E.g.s,” In *NELS* 24.

- (18) Kayne, Richard S. (1991) "Romance Clitics, Verb Movement, and PRO," *Linguistic Inquiry* 22, 647-686.
- (19) Baker, Mark (1988) *Incorporation*, University of Chicago Press, Chicago.
- (20) Pollock, Jean-Yves (1986) "Sur la Syntaxe de EN et le Paramètre du Sujet Nul," In Ronat & Couquaux (eds.), *La Grammaire Modulaire*, éd Minuit, Paris.
- (21) Elliott, W. Neil (1986) "On the Derivation of en-Clitics," In Hagit Borer (ed), *Syntax and Semantics* 19, Academic Press, San Diego.

CONTENTS

Invited Papers

Special Issue : Research Reports Specified by Muroran Institute of Technology

Behavior of Stress Corrosion Cracking on Aluminum-Magnesium Alloy 5182	Osami SERI and Kazunao FURUMATA	1
A Proposal for 3-D Pattern Primitive Input CAD Interface on the Basis of Spatial Gesture Identification.....	Sato SAGA and Naofumi YASUFUKU	9
Magnetoresistance, Magnetism and Superconductivity for Thin Film and Fine Particle Structures	Yuji UEDA, Mizushi MATSUDA, Susumu CHIKAZAWA, Akira SAKAI and Shoji IKEDA	21
Electrical Conductivity of Hexagonal Ru-B-M (M=Co, Mn, Cr)	Makoto SASAKI, Kazuki SAITO and Jun NAGANO	33
Inputs of Atmospheric Heavy Metals to the Kushiro Marsh in East Hokkaido	Hiroshi SHIRAHATA, Song YIN and Seiji NAKAMURA	41

Papers

Relaxation of Tightening Force in Joint with FRP Bolt and Nut (Analysis in consideration of stress-dependency of constitutive equation)	Ken-ichi SAITO, Kohshi NISHIDA and Masamizu ISHIOKA	47
Backer-Upper Control of Articulated Vehicles Using Fuzzy Reasoning	Mitsuhisa YAMASHITA, Hiromitsu HIKITA and Naohiko HANAJIMA	55
The Stability of the Solution of Partial Functional Differential Equation with Delay	Lixin DAI and Shanjun ZHANG	61
A System Design of Satellite Telecommunication Experiments Based on Very Small Aperture Terminal	Masahiko HATANAKA, Shinya SUZUKI, Wakio OKA and Ichiro SUGIOKA	67

An Experiment to Estimate Efficiency of Java Applet on WWW Misao WATANABE, Masahiko HATANAKA, Yasunori TAJIMA and Takashi AOKI	75
Optical Transmission Characteristics and Deliverable Capabilities for CO ₂ Laser Power of Chalcogenide Glasses and Fibers Ikuo INAGAWA, Toshiharu YAMASHITA, Junnji NISHII and Ichimin SHIROTANI	81
Central Cycles in Graphs Tadashi YAMAGUCHI, Les FOULDS and John LAMB	93
Numerical Estimation on Correlation Inequalities for Holley-Liggett Bounds Alex Yu. TRETYAKOV, Vladimir BELITSKY, Norio KONNO and Tadashi YAMAGUCHI	101
Husserl's Philosophy of Mathematics (1) —Non-Existence of the Notion 'Semantic Completeness' — Kohtaroh NINOMIYA	107
Cognition underlying converb "yaru" in Japanese Toshiharu MATSUMOTO and Toru SHIONOYA	117
A case study of a child with learning disability for reading and writing Kanji character Toshiharu MATSUMOTO	125
Interpersonal-relationship in psychological treatment Jun MAEDA and Toshiharu MATSUMOTO	137
On "Reawakening of the true church" in Jerusalem..... Eiko ANDO	147
„Siddhartha“ als Weltliteratur—eine vergleichende literaturwissenschaftliche Forschung Hideshige OMURA and Malcel Wenzel CHALUPA	153
Prenuclear elements in Hawaiian noun phrases..... Toru SHIONOYA	161
Neuter Clitics "y", "en" in French..... Takeshi FUJITA	169

図 書 館 委 員

委員長	附 属 図 書 館 長	教 授	松 岡 健 一
委 員	建 設 シ ス テ ム 工 学 科	〃	窪 田 英 樹
〃	機 械 シ ス テ ム 工 学 科	助 教 授	新 井 隆 景
〃	情 報 工 学 科	〃	佐 賀 聡 人
〃	電 気 電 子 工 学 科	〃	橋 本 幸 男
〃	材 料 物 性 工 学 科	教 授	後 藤 龍 彦
〃	応 用 化 学 科	助 教 授	田 邊 博 義
〃	共 通 講 座	〃	橋 本 邦 彦
〃	情報メディア教育センター	〃	倉 重 龍 一 郎
〃	国 際 交 流 室	〃	菅 野 光 公

平成10年11月13日 印 刷 (非売品)
平成10年11月13日 発 行

編 集 室 蘭 工 業 大 学
発 行
〒050-8585 室蘭市水元町27-1

印 刷 (株)不二プリント印刷所
室蘭市輪西町2丁目1番11号
TEL (0143) 4 4 - 5 3 0 1

表紙デザイン 目 黒 泰 道

